



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TL141584

# **ANALISIS PENGARUH VARIASI TEMPERATUR DAN WAKTU TAHAN *TEMPERING* TERHADAP SIFAT KEKERASAN DAN KETAHANAN AUS MATERIAL ASTM A532 CLASS III TYPE A YANG DI-*HARDENING* SEBAGAI SOLUSI KEGAGALAN *CHUTE INLET FEED LINER* PADA *VERTICAL ROLLER MILL***

QORY MAGHFIROH  
NRP. 2713 100 034

Dosen Pembimbing :  
Budi Agung Kurniawan, S.T., M.Sc.  
Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2017



TUGAS AKHIR - TL141584

**ANALISIS PENGARUH VARIASI TEMPERATUR  
DAN WAKTU TAHAN *TEMPERING* TERHADAP  
SIFAT KEKERASAN DAN KETAHANAN AUS  
MATERIAL ASTM A532 CLASS III TYPE A  
YANG DI-*HARDENING* SEBAGAI SOLUSI  
KEGAGALAN *CHUTE INLET FEED LINER* PADA  
*VERTICAL ROLLER MILL***

QORY MAGHFIROH  
NRP. 2713 100 034

Dosen Pembimbing :  
Budi Agung Kurniawan, S.T., M.Sc.  
Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2017

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



**FINAL PROJECT - TL141584**

# **THE EFFECT OF TEMPERING TEMPERATURE AND HOLDING TIME ON HARDNESS AND WEAR RESISTANCE OF HARDENED ASTM A532 CLASS III TYPE A AS A SOLUTION FOR CHUTE INLET FEED LINER FAILURE IN VERTICAL ROLLER MILL**

**QORY MAGHFIROH  
NRP. 2713 100 034**

**Advisor:**

**Budi Agung Kurniawan, S.T., M.Sc.**

**Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc.**

**MATERIALS ENGINEERING DEPARTMENT  
Faculty of Industrial Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya  
2017**



*(This page is left intentionally blank)*

## LEMBAR PENGESAHAN

### TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar  
Sarjana Teknik

Pada

Bidang Studi Metalurgi dan Manufaktur  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Material  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh

**QORY MAGHFIROH**

NRP 2713 100 034

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

Budi Agung Kurniawan, S.T., M.Sc. .... (Pembimbing I)

Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc. .... (Pembimbing II)



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

**Analisis Pengaruh Variasi Temperatur dan Waktu Tahan  
Tempering terhadap Sifat Kekerasan dan Ketahanan Aus  
Material ASTM A532 Class III Type A yang Di-hardening  
sebagai Solusi Kegagalan Chute Inlet Feed Liner pada  
Vertical Roll Mill**

**Nama Mahasiswa** : Qory Maghfiroh  
**NRP** : 2713100034  
**Departemen** : Teknik Material  
**Dosen Pembimbing** : Budi Agung Kurniawan, S.T., M.Sc.  
Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc

**Abstrak**

*Chute inlet feed* merupakan saluran masuk *feed material* dari *belt conveyor* menuju *rotary feeder* pada *vertical roller mill*. Kondisi kerja dari bagian ini membutuhkan komponen yang memiliki kekerasan dan ketahanan aus yang tinggi agar proses dapat berlangsung dengan baik. Oleh karena itu dipasanglah *liner* pada *chute inlet feed* yang terbuat dari material yang sesuai dengan kondisi kerja. Namun *liner* yang digunakan masih mengalami keausan sebelum umur pakai yang diharapkan. Dalam penelitian ini dilakukan analisis penyebab terjadinya kegagalan pada *chute inlet feed liner* dan salah satu solusinya. Pengujian yang dilakukan dalam penelitian ini adalah pengujian komposisi, pengujian metalografi, pengujian XRD, pengujian kekerasan, dan pengujian ketahanan aus. Dari pengujian komposisi diperoleh bahwa material *liner* yang digunakan adalah ASTM A532 Class III Type A. Material *liner* ini mengalami kegagalan karena terjadinya mekanisme *abrasive wear*. Untuk memperbaiki sifat kekerasan dan ketahanan ausnya, kemudian dilakukan proses pemanasan pada material ini hingga temperatur 950°C dengan waktu tahan 60 menit, kemudian didinginkan dengan media pendingin oli. Lalu dilakukan proses *tempering* pada temperatur 200°C, 250°C, dan 300°C dengan waktu tahan 40 menit, 80 menit,

dan 120 menit. Setelah proses perlakuan panas diperoleh nilai kekerasan yang paling tinggi dan nilai laju keausan yang paling rendah pada temperatur *tempering* 250°C dan waktu tahan 120 menit. Nilai kekerasan material *liner* dengan perlakuan tersebut mencapai 748,04 HV dan laju keausannya 6,01 mm/hari. Laju keausan yang rendah menunjukkan bahwa material memiliki ketahanan aus yang tinggi.

***Kata Kunci : Liner, ASTM A532 Class III Type A, Tempering, Kekerasan, Ketahanan Aus***

**The Effect of Tempering Temperature and Holding Time on  
Hardness and Wear Resistance of Hardened ASTM A532  
Class III Type A as a Solution for Chute Inlet Feed Liner  
Failure in Vertical Roller Mill**

**Name** : Qory Maghfiroh  
**SRN** : 2713100034  
**Department** : Materials Engineering  
**Advisor** : Budi Agung Kurniawan, S.T., M.Sc.  
Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc

**Abstract**

Chute inlet feed is a chamber where the feed materials fall down from belt conveyor toward rotary feeder in vertical roller mill. This condition requires material with excellent hardness and wear resistance in order to make the process work sustainably. Therefore a liner with an appropriate material need to be assembled on chute inlet feed. However, a failure occurs even when the liner material has not attained the lifetime yet. This study investigate cause of failure on chute inlet feed liner and the alternative solution. Several examinations need to be performed, such as Optical Emission Spectroscopy (OES), metallography, XRD, hardness, and wear resistance. The OES examination shows that liner material which has been used comply with ASTM A532 Class III Type A. The failure of this liner occurs due to abrasive wear mechanism. To improve hardness and wear resistance, materials was heated to 950°C and held for 60 minutes. This process followed by oil quench. After that, tempering process was applied with various temperature (200°C, 250°C, and 300°C) and holding time (40 minutes, 80 minutes, and 120 minutes). The results show that the highest hardness value 748,04 HV and lowest wear rate 6,01 mm/day was obtained at the

tempering temperature 250°C and holding time 120 minutes. Low wear rate indicate a high wear resistance.

***Keywords : Liner, ASTM A532 Class III Type A, Tempering, Hardness, Wear Resistance***

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis sampaikan kehadirat Allah SWT, karena limpahan rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dan menyusun laporan tugas akhir dengan judul **“Analisis Pengaruh Variasi Temperatur dan Waktu Tahan *Tempering* terhadap Sifat Kekerasan dan Ketahanan Aus Material ASTM A532 Class III Type A yang Di-hardening Sebagai Solusi Kegagalan *Chute Inlet Feed Liner* pada *Vertical Roller Mill*”**.

Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, laporan tugas akhir ini tidak dapat terselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak yang telah memberikan dukungan, bimbingan, dan kesempatan kepada penulis hingga laporan tugas akhir ini dapat diselesaikan, di antaranya:

1. Kedua orang tua dan keluarga yang tidak pernah henti memberikan doa dan dukungan.
2. Dr. Ir. Agung Purniawan, S.T, M.Eng., selaku Ketua Departemen Teknik Material FTI-ITS.
3. Budi Agung Kurniawan, S.T., M.Sc. dan Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc. selaku dosen pembimbing tugas akhir penulis yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu selama pengerjaan tugas akhir.
4. Deno Mandrial, S.T. selaku pembimbing di PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu selama pengerjaan tugas akhir.
5. Wikan Jatimurti S.T., M.Sc. selaku dosen wali yang selalu membimbing selama proses perkuliahan penulis.
6. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Material FTI-ITS.
7. Rekan-rekan mahasiswa Departemen Teknik Material FTI-ITS.
8. Serta seluruh pihak yang telah memberikan dukungan dalam penulisan laporan tugas akhir ini.



Penulis menyadari bahwa dalam pembuatan laporan ini terdapat banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran dari pembaca demi kesempurnaan laporan tugas akhir ini. Penulis berharap laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi seluruh pihak yang membaca.

Surabaya, Juli 2017  
Penulis,

Qory Maghfiroh  
2713100034

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL.....</b>	<b>i</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN.....</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRAK.....</b>	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>ix</b>
<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xvii</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>xxi</b>
<b>BAB I. PENDAHULUAN</b>	
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	2
1.3. Batasan Masalah.....	3
1.4. Tujuan Penelitian.....	3
1.5. Manfaat Penelitian.....	3
<b>BAB II. TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1. <i>Vertical Roller Mill</i> .....	5
2.2. <i>Chute Inlet Feed Liner</i> .....	6
2.3. <i>Material Chute Inlet Feed Liner</i> .....	8
2.3.1. <i>Material Standar (Ni-Hard)</i> .....	8
2.3.2. <i>Material yang Mengalami Kegagalan (ASTM A532)</i> ..	9
2.4. <i>Baja</i> .....	10
2.5. <i>Besi Tuang (Cast Iron)</i> .....	12
2.5.1. <i>Besi Tuang Putih (White Cast Iron)</i> .....	12
2.5.2. <i>High Chromium White Cast Iron</i> .....	13
2.6. <i>Analisis Kegagalan</i> .....	17
2.6.1. <i>Wear (Keausan)</i> .....	17
2.6.2. <i>Analisis Keausan sebagai Mekanisme Kegagalan</i> .....	19
2.7. <i>Perlakuan Panas (Heat Treatment)</i> .....	20
2.7.1. <i>Pengerasan (Hardening)</i> .....	20
2.7.2. <i>Austenitisasi</i> .....	21
2.7.3. <i>Pendinginan (Quenching)</i> .....	22
2.7.4. <i>Tempering</i> .....	23

2.7.5. Pengaruh Unsur Paduan terhadap Proses Perlakuan Panas.....	23
2.8. Pengujian .....	24
2.8.1. Pengujian Kekerasan .....	25
2.8.2. Pengujian ketahanan Aus .....	26
<b>BAB III. METODOLOGI PENELITIAN</b>	
3.1. Diagram Alir Penelitian.....	35
3.2. Metode Penelitian .....	36
3.3. Material yang digunakan .....	36
3.4. Peralatan .....	37
3.5. Tahapan Penelitian .....	42
3.5.1. Review Dokumen Perusahaan.....	42
3.5.2. Preparasi Spesimen .....	42
3.5.3. Pengujian Komposisi.....	43
3.5.4. Proses Perlakuan Panas .....	43
3.5.5. Pengujian Metalografi .....	44
3.5.6. Pengujian Kekerasan .....	44
3.5.7. Pengujian Ketahanan Aus .....	45
3.5.8. Pengujian XRD .....	47
3.6. Rancangan Penelitian .....	48
<b>BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN</b>	
4.1 Analisa Data Kegagalan Material.....	49
4.1.1. Historis <i>Chute Inlet Feed Liner</i> pada <i>Vertical Roller Mill</i> .....	49
4.1.2. Pengamatan Makroskopik pada <i>Chute Inlet Feed Liner</i> yang Mengalami Kegagalan .....	50
4.1.3. Hasil Uji Komposisi Material <i>Liner</i> .....	52
4.1.4. Hasil Uji XRD Material <i>Liner</i> yang Mengalami Kegagalan.....	53
4.1.5. Hasil Uji Struktur Mikro Material <i>Liner</i> yang Mengalami Kegagalan.....	54
4.1.6. Hasil Uji Kekerasan Material <i>Liner</i> yang Mengalami Kegagalan.....	55
4.2. Analisis Proses Perlakuan Panas Material <i>Liner</i> .....	56

4.2.1. Hasil Uji XRD Material <i>Liner</i> setelah Proses Perlakuan Panas. ....	52
4.2.2. Hasil Uji Struktur Mikro Material <i>Liner</i> setelah Proses Perlakuan Panas.....	64
4.2.3. Hasil Uji Kekerasan Material <i>Liner</i> setelah Proses Perlakuan Panas.....	70
4.2.4. Hasil Uji Ketahanan Aus Material <i>Liner</i> setelah Proses Perlakuan Panas.....	72
4.3. Pembahasan.....	74
<b>BAB V KESIMPULAN</b>	
5.1 Kesimpulan.....	79
5.2 Saran.....	79
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>xxiii</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>xxvii</b>
<b>UCAPAN TERIMA KASIH.....</b>	<b>lxv</b>
<b>BIOGRAFI PENULIS .....</b>	<b>lxvii</b>

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 <i>Vertical roller mill</i> (FLSmidth, 2016) .....	5
Gambar 2.2 Skema lokasi <i>chute inlet feed liner</i> .....	7
Gambar 2.3 Kondisi di dalam <i>chute inlet feed</i> .....	8
Gambar 2.4 Diagram fasa Fe- Fe <sub>3</sub> C (Avner, 1974).....	11
Gambar 2.5 Struktur mikro besi tuang putih (Ortega- Cubillos, 2015).....	13
Gambar 2.6 Diagram fasa ekuilibrium <i>high chromium white cast iron</i> dengan kadar kromium 25% (Li, et al, 2009).....	14
Gambar 2.7 (a) Hasil SEM <i>high chromium white cast iron</i> yang menunjukkan bentuk <i>hexagonal rod</i> (b) Hasil TEM rongga pada karbida yang diisi oleh matriks (Nurjaman, 2012).....	16
Gambar 2.8 Mekanisme <i>adhesive wear</i> (Askeland, 2010). 17	
Gambar 2.9 Mekanisme <i>abrasive wear</i> (Askeland, 2010). 18	
Gambar 2.10 Skema perlakuan panas untuk pengerasan <i>high chromium white cast irons</i> (ASM Handbook Vol. 4, 1991).....	21
Gambar 2.11 Pengaruh temperatur austenitisasi pada kekerasan (H) dan austenit sisa (x) pada <i>high chromium white cast iron</i> (ASM Handbook Vol. 4, 1991).....	22
Gambar 2.12 Diagram CCT untuk <i>class III</i> (28% Cr) <i>white cast iron</i> yang mengandung 2,6% C, 0,8% Si, 0,6% Mn, dan 27,8% Cr (ASM Handbook Vol. 4, 1991) .....	23
Gambar 2.13 Diagram TTT besi tuang (Avner, 1974).....	24
Gambar 2.14 Pengaruh unsur paduan pembentuk karbida (Avner, 1974) .....	25
Gambar 2.15 Skema pengujian ketahanan aus dengan metode <i>pin on disk</i> (ASTM G99, 2003).....	26

Gambar 2.16 Struktur mikro <i>high chromium white cast iron</i> (a) <i>as cast</i> (b) <i>as quench</i> (Bahfie, 2015) .....	28
Gambar 2.17 Nilai kekerasan <i>high chromium white cast iron</i> 2,8% C; 22% Cr; 2,8% Ni (a) <i>as-cast</i> dan setelah di- <i>quenching</i> (b) <i>tempering</i> dengan temperatur yang berbeda (Bahfie, 2015).....	29
Gambar 2.18 Struktur mikro <i>high chromium white cast iron</i> dengan variasi temperatur (a) 250 °C, (b) 300 °C, dan (c) 350 °C (Bahfie, 2015).....	30
Gambar 2.19 Struktur mikro material ASTM A532 <i>type II-A</i> dengan mikroskop optik pada kondisi <i>as-cast</i> (Astuti, 2015) .....	31
Gambar 2.20 Struktur mikro material ASTM A532 <i>type II-A</i> dengan media pendingin oli pada kondisi (a) <i>as-quenched</i> (b) <i>tempering</i> 250 °C (c) <i>tempering</i> 300 °C (d) <i>tempering</i> 350 °C (Astuti, 2015) .....	32
Gambar 2.21 Struktur mikro material ASTM A532 <i>type II-A</i> dengan media pendingin udara paksa pada kondisi (a) <i>as-quenched</i> (b) <i>tempering</i> 250 °C (c) <i>tempering</i> 300 °C (d) <i>tempering</i> 350 °C (Astuti, 2015) .....	32
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian .....	35
Gambar 3.2 (a) <i>New liner</i> (b) <i>Failure liner</i> .....	37
Gambar 3.3 Kamera DSLR .....	38
Gambar 3.4 Mesin <i>wire cut</i> .....	38
Gambar 3.5 Mesin OES ( <i>Optical Emission Spectroscopy</i> ) .	38
Gambar 3.6 <i>Furnace</i> .....	39
Gambar 3.7 Mesin uji kekerasan .....	39
Gambar 3.8 <i>Abrasive paper</i> .....	40
Gambar 3.9 Mesin <i>polish</i> .....	40
Gambar 3.10 Mikroskop Optik .....	41

Gambar 3.11 Mesin pengujian XRD .....	41
Gambar 3.12 Alat uji ketahanan aus .....	42
Gambar 3.13 Siklus termal perlakuan panas penelitian .....	43
Gambar 3.14 Letak dilakukannya pengujian kekerasan pada material yang gagal .....	45
Gambar 3.15 Titik indentasi pada setiap spesimen .....	45
Gambar 3.16 Skema uji ketahanan aus material (a) spesimen (b) beban (c) <i>holder</i> (d) material abrasif dapat berupa kertas amplas atau batu gerinda (e) piringan pemutar (f) penyangga (Yuswono, 2004) .....	46
Gambar 4.1 <i>Chute inlet feed liner assembly</i> .....	49
Gambar 4.2 Material <i>liner</i> (a) <i>New liner</i> (b) <i>Failure liner</i> . 50	
Gambar 4.3 (a) Penampang permukaan material <i>liner</i> yang mengalami kegagalan (b) Pengurangan ketebalan pada material <i>liner</i> .....	51
Gambar 4.4 Grafik XRD material <i>liner</i> yang mengalami kegagalan.....	53
Gambar 4.5 Struktur mikro material <i>liner</i> (a) <i>New liner</i> (b) <i>Failure liner</i> . Perbesaran 200X.....	55
Gambar 4.6 Grafik nilai kekerasan material <i>new liner</i> dan <i>failure liner</i> .....	56
Gambar 4.7 Grafik XRD material <i>liner as quenched</i> .....	57
Gambar 4.8 Grafik XRD material <i>liner</i> setelah <i>tempering</i> 200°C .....	58
Gambar 4.9 Grafik XRD material <i>liner</i> setelah <i>tempering</i> 250°C .....	58
Gambar 4.10 Grafik XRD material <i>liner</i> setelah <i>tempering</i> 300°C .....	59
Gambar 4.11 Struktur mikro material <i>liner as quenched</i> . Perbesaran 200X. ....	63



Gambar 4.12 Struktur mikro material <i>liner</i> setelah <i>tempering</i> 200°C dengan waktu tahan (a) 40 menit (b) 80 menit (c) 120 menit. Perbesaran 200X.....	65
Gambar 4.13 Struktur mikro material <i>liner</i> setelah <i>tempering</i> 250°C dengan waktu tahan (a) 40 menit (b) 80 menit (c) 120 menit. Perbesaran 200X.....	67
Gambar 4.14 Struktur mikro material <i>liner</i> setelah <i>tempering</i> 300°C dengan waktu tahan (a) 40 menit (b) 80 menit (c) 120 menit. Perbesaran 500X.....	68
Gambar 4.15 Grafik nilai kekerasan <i>new liner</i> , <i>failure liner</i> , <i>as quenched liner</i> , dan material yang diberi perlakuan panas <i>tempering</i> dengan variasi temperatur dan waktu tahan .....	70
Gambar 4.16 Grafik laju keausan material <i>liner</i> setelah proses perlakuan panas.....	72

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Komposisi Kimia Material <i>Ni-Hard</i> (Rohrig, 1996) .....	8
Tabel 2.2 Sifat Mekanik <i>Ni-Hard</i> (Rohrig, 1996) .....	9
Tabel 2.3 Komposisi Kimia ASTM A532 (ASTM A532, 2003) .....	9
Tabel 2.4 Komposisi Kimia ASTM A532 (ASTM A532, 2003) .....	10
Tabel 2.5 Perbandingan Kekerasan Fasa yang Terbentuk pada <i>High Chromium White Cast Iron</i> (Kopycinski, 2014; Wiengmoon, 2011) .....	16
Tabel 2.6 Nilai Kekerasan dari Beberapa Material Abrasif (Wiengmoon, 2011) .....	19
Tabel 3.1 Parameter Uji Kekerasan .....	44
Tabel 3.2 Parameter Uji Ketahanan Aus .....	47
Tabel 3.3 Parameter Uji XRD .....	47
Tabel 3.4 Rancangan Penelitian .....	48
Tabel 4.1 Data Operasi <i>Chute Inlet Feed Liner</i> .....	50
Tabel 4.2 Perbandingan Komposisi Material <i>Liner</i> yang Digunakan dengan Material Standar <i>Ni-Hard</i> ...	52
Tabel 4.3 Daftar <i>Peak</i> Hasil Uji XRD <i>Failure Liner</i> .....	54
Tabel 4.4 Data Hasil Pengujian Kekerasan <i>New</i> dan <i>Failure Liner</i> .....	56
Tabel 4.5 Perbandingan Daftar <i>Peak</i> pada Material <i>Liner</i> setelah Proses Perlakuan Panas .....	59
Tabel 4.6 Perhitungan Nilai <i>Microstrain Broadening</i> .....	62
Tabel 4.7 Rata-rata Nilai Kekerasan Material Setelah Proses Perlakuan Panas .....	69
Tabel 4.8 Perbandingan Laju Keausan dan Kekerasan Material <i>Liner</i> Setelah Proses Perlakuan Panas.	71

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk (dahulu PT. Semen Gresik (Persero) Tbk) merupakan perusahaan penghasil semen yang terbesar di Indonesia. Proses pembuatan semen PT. Semen Indonesia unit Tuban IV secara garis besar melalui proses dengan dimulai dari pengambilan bahan baku, proses pembuatan terak (*clinker*), proses penggilingan semen (*milling*), penyimpanan dalam *silo*, dan pengemasan semen (*packing*). Proses pembuatan terak (*clinker*) meliputi pemanasan awal, pengeringan dalam *rotary kiln*, dan pendinginan (*cooling*). Proses penggilingan meliputi pencampuran dengan bahan aditif, penggerusan, dan pembentukan *powder*. *Packing* yaitu memasukan semen ke dalam kemasan dan menyimpan ke dalam gudang.

Pengolahan bahan awal pada industri semen biasa disebut dengan *raw mill*. *Raw mill* berfungsi untuk menghaluskan dan mengeringkan material hingga kadar airnya kurang dari 1% menggunakan *vertical roller mill*. Material tersebut masuk ke dalam *vertical roller mill* dengan komposisi 89,7% campuran antara batu kapur dengan tanah liat, 9% kapur yang ditambahkan ketika sistem yang dihasilkan kekurangan batu kapur, 1% pasir besi, dan 0.3% pasir silika. Material-material tersebut masuk ke dalam *roller mill* melalui alat transportasi berupa *belt conveyor* menuju ke *rotary feeder*. *Rotary feeder* berfungsi untuk menstabilkan masuknya material ke dalam *vertical roller mill*.

*Chute inlet feed* merupakan saluran masuk *feed material* dari *belt conveyor* menuju *rotary feeder* pada *vertical roller mill*. *Raw material* jatuh dari *belt conveyor* setinggi 5 meter dengan debit 700 tph. Kemudian material tersebut meluncur menuju *rotary feeder* untuk selanjutnya diproses dalam *vertical roller mill*. Temperatur kerja pada bagian ini berkisar antara 80-100 °C. Dengan spesifikasi kerja yang demikian, dibutuhkan komponen yang memiliki kekerasan dan ketahanan aus yang tinggi agar



proses dapat berlangsung dengan baik. Oleh karena itu dipasanglah *liner* pada *chute inlet feed* yang terbuat dari material yang sesuai dengan kondisi kerja.

Namun, pada kenyataannya material *liner* yang diharapkan mampu beroperasi hingga 1 tahun sudah mengalami keausan yang cukup signifikan hanya dalam 9 bulan. Oleh karena itu dirasa perlu untuk melakukan penelitian guna menganalisis penyebab kegagalan yang terjadi dan meminimalisir terjadinya keausan pada material *liner* yang ada di PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk.

## 1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Apa faktor penyebab terjadinya kegagalan pada komponen *chute inlet feed liner* pada *vertical roller mill*?
2. Bagaimana pengaruh proses *tempering* dengan variasi waktu tahan dan temperatur terhadap sifat kekerasan dan ketahanan aus sebagai solusi kegagalan yang terjadi pada komponen *chute inlet feed liner* pada *vertical roller mill*?

## 1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian ini menjadi terarah dan memberikan kejelasan analisis permasalahan, maka dilakukan pembatasan permasalahan sebagai berikut.

1. Data operasi pada *vertical roller mill* telah memenuhi standar operasional.
2. Desain *chute inlet feed liner* pada *vertical roller mill* telah memenuhi standar operasional.
3. Material dianggap homogen di semua sisi.
4. Diasumsikan tidak ada penurunan temperatur saat material uji keluar dari *furnace*.
5. Diasumsikan pemanasan di dalam *furnace* homogen di semua bagian.



6. Lama waktu pemindahan spesimen uji dari *furnace* ke media pendingin diasumsikan konstan pada semua spesimen uji.

#### 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari dilaksanakannya penelitian ini adalah:

1. Menganalisis faktor penyebab terjadinya kegagalan pada komponen *chute inlet feed liner* pada *vertical roller mill*.
2. Menganalisis pengaruh proses *tempering* dengan variasi waktu tahan dan temperatur terhadap sifat kekerasan dan ketahanan aus sebagai solusi kegagalan yang terjadi pada komponen *chute inlet feed liner* pada *vertical roller mill*.

#### 1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan mampu memberi manfaat kepada seluruh pihak yang berkaitan. Bagi mahasiswa sebagai pelaksana penelitian diharapkan mampu memahami dan mengaplikasikan ilmu yang telah. Kemudian bagi PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk sebagai pihak yang menyokong penelitian dapat menerapkan hasil penelitian sebagai referensi untuk aplikasi penggunaan di lapangan.



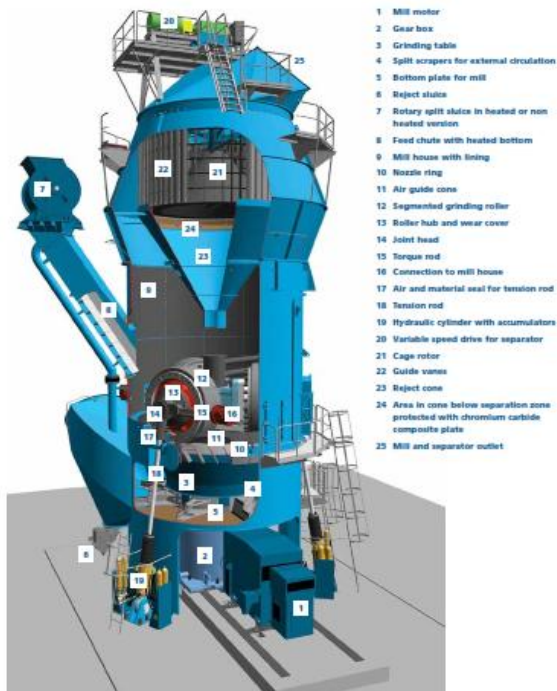
*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Vertical Roller Mill

Pada industri semen, *raw material* yang telah ditambah dimasukkan ke dalam *pile* untuk selanjutnya diangkut ke dalam *bin*. *Bin* adalah tempat pencampuran untuk *feed* dari *raw mill*. Dalam proses di *raw mill*, terdapat 4 jenis *bin*, *bin* pertama berisi batu kapur koreksi yang akan ditambahkan pada proses produksi ketika dinilai kualitas semen kurang, *bin* kedua berisi campuran antara batu kapur dan tanah liat, *bin* ketiga berisi pasir besi, sedangkan *bin* keempat berisi pasir silika.



**Gambar 2.1** Vertical roller mill (FLSmidth, 2016)





Material-material tersebut selanjutnya dilakukan pengolahan bahan awal atau biasa disebut dengan *raw mill*. *Raw mill* berfungsi untuk menghaluskan dan mengeringkan material hingga kadar airnya kurang dari 1% menggunakan *vertical roller mill*. Material tersebut masuk ke dalam *vertical roller mill* dengan komposisi 89,7% campuran antara batu kapur dengan tanah liat, 9% kapur yang ditambahkan ketika sistem yang dihasilkan kekurangan batu kapur, 1% pasir besi, dan 0.3% pasir silika (Hanidya, 2016)

Gambar 2.1 menunjukkan komponen-komponen pada *vertical roller mill*. Proses penggilingan dimulai dengan memasukkan *raw material* ke dalam *roller mill* dengan menggunakan *belt conveyor* menuju ke *rotary feeder* (bagian 7). *Rotary feeder* berfungsi untuk menstabilkan masuknya material ke dalam *vertical roller mill* (Hanidya, 2016). *Vertical roller mill* menggunakan tekanan sebesar 23-25 bar yang dihasilkan oleh *roller* (bagian 12) dan *rotating table* (bagian 3) untuk menghancurkan *raw material*. *Feed material* masuk ke dalam *grinding table* melalui *feed chute* (bagian 8). Rotasi dari *grinding table* membuat material bergerak ke bagian bawah *roller*. Material yang kasar akan melewati *dam ring* mengelilingi *grinding table* dan masuk ke dalam *hot gas stream* yang dihasilkan *nozzle ring*. Sisa air dari material menguap dalam waktu yang singkat dan material yang halus terbawa ke *separator* (bagian 22) dengan gaya dari *hot gas*. Material yang keluar dari *vertical roller mill* diharapkan tidak lebih besar dari 10  $\mu\text{m}$  (FLSmidth, 2016).

*Vertical roller mill* pada Pabrik Tuban IV menggunakan produk dari FLSmidth jenis Atox Mill 57,5 dengan kapasitas sebesar 700-800 tph.

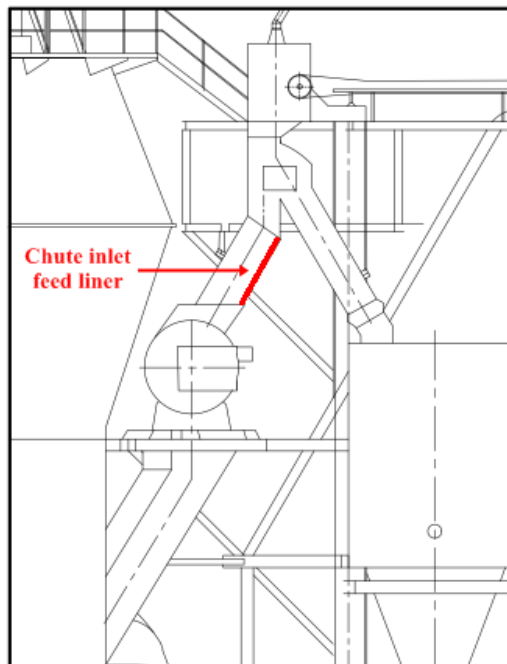
## 2.2 Chute Inlet Feed Liner

*Chute inlet feed* merupakan saluran masuk *feed material* dari *belt conveyor* menuju *rotary feeder* pada *vertical roller mill*. *Raw material* jatuh dari *belt conveyor* setinggi 5 meter dengan

---

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

debit 700 tph. Kemudian material tersebut meluncur menuju *rotary feeder* untuk selanjutnya diproses dalam *vertical roller mill*. Dengan spesifikasi kerja yang demikian, maka dibutuhkan komponen yang memiliki kekerasan dan ketahanan aus yang tinggi agar proses dapat berlangsung dengan baik. Oleh karena itu dipasanglah *liner* pada *chute inlet feed* yang terbuat dari material yang sesuai dengan kondisi kerja.



**Gambar 2.2** Skema lokasi *chute inlet feed liner*

Gambar 2.2 menunjukkan lokasi dipasangnya *chute inlet feed liner* pada *vertical roller mill*. Sementara pada Gambar 2.3 terlihat kondisi di dalam *feed chute* dengan *lining* yang telah terpasang.



**Gambar 2.3** Kondisi di dalam *chute inlet feed*

## 2.3 Material *Chute Inlet Feed Liner*

### 2.3.1 Material standar (*Ni-Hard*)

Material *chute inlet feed liner* yang seharusnya digunakan di PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk Pabrik Tuban IV adalah material *Ni-Hard*. *Ni-Hard* merupakan sebutan umum untuk *white cast iron* yang dipadukan dengan nikel dan kromium agar menghasilkan sifat kekerasan dan ketahanan aus yang baik. *Ni-Hard* memiliki struktur mikro yang terdiri atas karbida dan martensitik-austenitik-bainitik atau didominasi oleh matriks martensitik. Struktur ini dapat diperoleh dengan komposisi yang tepat dari karbon, nikel, kromium, silikon, dan perlakuan panas yang diberikan (Rohrig, 1996). Komposisi kimia material *Ni-Hard* ditunjukkan oleh Tabel 2.1 dan sifat mekaniknya ditunjukkan oleh Tabel 2.2.

**Tabel 2.1** Komposisi Kimia Material *Ni-Hard* (Rohrig, 1996)

Grade	Chemical composition (weight %)							
	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Mo
<i>Ni-Hard</i> <b>1</b>	3,0- 3,6	0,3- 0,5	0,3- 0,7	max 0,15	max 0,3	3,3- 4,8	1,5- 2,6	0- 0,4
<i>Ni-Hard</i> <b>2</b>	max 2,9	0,3- 0,5	0,3- 0,7	max 0,15	max 0,3	3,3- 5,0	1,4- 2,4	0- 0,4
<i>Ni-Hard</i> <b>4</b>	2,6- 3,2	1,8- 2,0	0,4- 0,6	max 0,1	max 0,06	4,5- 6,5	8,0- 9,0	0- 0,4

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA



**Tabel 2.2** Sifat Mekanik *Ni-Hard* (Rohrig,1996)

Type	Hardness			Tensile Strength (MPa)	Modulus of Elasticity (GPa)	Impact Energy (J)
	Brinell	Vickers	Rockwell C			
<b>Ni- Hard 1</b>						
<i>Sand cast</i>	550-690	640-750	56-63	280-350	169-183	28-41
<i>Chill cast</i>	600-730	700-860	58-65	350-420	169-183	35-55
<b>Ni-Hard 2</b>						
<i>Sand cast</i>	530-630	630-740	54-60	320-390	169-183	35-48
<i>Chill cast</i>	580-680	680-800	57-62	420-530	169-183	48-76
<b>Ni-Hard 4</b>	550-700	650-820	56-63	500-600	190-200	-

### 2.3.2 Material yang mengalami kegagalan (ASTM A 532)

Material *chute inlet feed liner* yang mengalami kegagalan adalah material ASTM A532. Spesifikasi material ini merupakan kelompok *white cast irons* yang ditambahkan paduan untuk menjaga ketahanan aus material dalam aplikasi penggunaannya di bidang pertambangan, *milling*, *earth-handling*, dan industri manufaktur (ASTM A532, 2003).

**Tabel 2.3** Komposisi Kimia ASTM A532 (ASTM A532, 2003)

Class	Type	Designation	Chemical Composition							
			C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	P	S
<b>I</b>	A	Ni-Cr-Hc	2,8-	2,0	0,8	3,3-	1,4-	1,0	0,3	0,15
			3,6	max	max	5,0	4,0	max	max	max
<b>I</b>	B	Ni-Cr-Lc	2,4-	2,0	0,8	3,3-	1,4-	1,0	0,3	0,15
			3,0	max	max	5,0	4,0	max	max	max
<b>I</b>	C	Ni-Cr-GB	2,5-	2,0	0,8	4,0	1,0-	1,0	0,3	0,15
			3,7	max	max	max	2,5	max	max	max
<b>I</b>	D	Ni-HiCr	2,5-	2,0	2,0	4,5-	7,0-	1,5	0,1	0,15
			3,6	max	max	7,0	11,0	max	max	max
<b>II</b>	A	12% Cr	2,0-	2,0	1,5	2,5	11,0-	3,0	0,1	0,06
			3,3	max	max	max	14,0	max	max	max
<b>II</b>	B	15% Cr-Mo	2,0-	2,0	1,5	2,5	14,0-	3,0	0,1	0,06
			3,3	max	max	max	18,0	max	max	max
<b>II</b>	D	20% Cr-Mo	2,0-	2,0	1,0-	2,5	18,0-	3,0	0,1	0,06
			3,3	max	2,2	max	23,0	max	max	max
<b>III</b>	A	25% Cr	2,0-	2,0	1,5	2,5	23,0-	3,0	0,1	0,06
			3,3	max	max	max	30,0	max	max	max

Paduan yang terdapat pada spesifikasi material ini diharapkan akan membentuk struktur mikro yang terdiri dari karbida, martensit, bainit, austenit, dan dalam kasus tertentu



terdapat sedikit grafit atau perlit (ASTM A532, 2003). Di bawah ini merupakan nilai kekerasan dari beberapa kelas dan tipe material ASTM A532.

**Tabel 2.4** Komposisi Kimia ASTM A532 (ASTM A532, 2003)

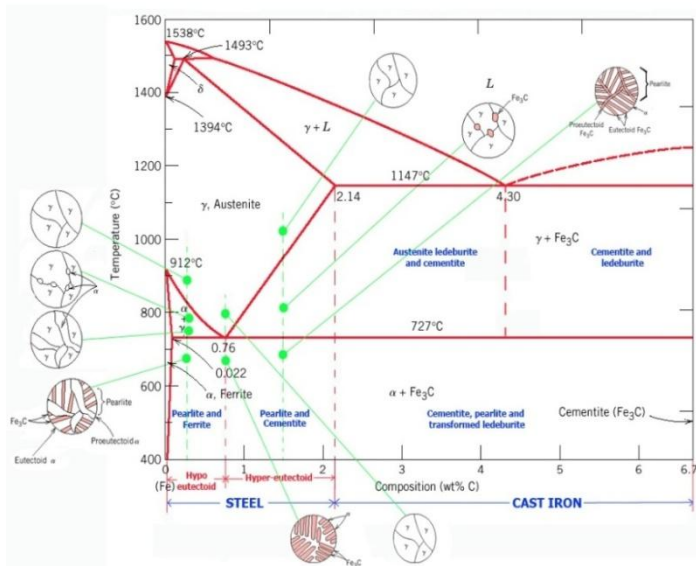
Class	Type	Designation	As Cast or As Cast and Stress Relieved		Hardened or Hardened and Stress Relieved					
			HB	HRC	Level 1			Level 2		
					HV	HB	HRC	HV	HB	HRC
I	A	Ni-Cr-HiC	550	53	600	600	56	660	650	59
I	B	Ni-Cr-LoC	550	53	600	600	56	660	650	59
I	C	Ni-Cr-GB	550	53	600	600	56	660	650	59
I	D	Ni-HiCr	500	50	540	600	56	660	650	59
II	A	12 % Cr	550	53	600	600	56	660	650	59
II	B	15 % Cr-Mo	450	46	485	600	56	660	650	59
II	D	20 % Cr-Mo	450	46	485	600	56	660	650	59
III	A	25 % Cr	450	46	485	600	56	660	650	59

## 2.4 Baja

Baja adalah paduan besi dan karbon yang mungkin mengandung unsur paduan lainnya; ada banyak jenis paduan yang memiliki komposisi dan perlakuan panas yang berbeda. Pada umumnya baja diklasifikasikan menurut konsentrasi karbon yaitu karbon rendah, menengah, dan tinggi. Baja karbon rendah mengandung kurang dari 0,25% karbon, baja karbon menengah mengandung konsentrasi karbon sebanyak 0,25-0,60%, sedangkan baja karbon tinggi biasanya terdiri atas 0,60-1,40% karbon. Selain itu baja juga dapat dikelompokkan berdasarkan kandungan unsur paduannya. Baja karbon biasa (*plain carbon steel*) yang hanya berisi konsentrasi karbon dan baja selain itu memiliki sedikit pengotor dan sedikit paduan mangan. Untuk baja paduan, unsur paduan ditambahkan untuk tujuan tertentu dengan konsentrasi tertentu. (Callister, 2010).

Diagram keseimbangan besi-karbon cukup kompleks, tetapi hanya sebagian saja yang penting bagi dunia teknik, yaitu bagian antara besi murni sampai senyawa interstisialnya, karbida besi  $\text{Fe}_3\text{C}$ , yang mengandung 6,67 %C. Diagram fasa yang banyak digunakan adalah diagram fasa besi-karbida besi, diagram fasa Fe –  $\text{Fe}_3\text{C}$ . Diagram fasa Fe –  $\text{Fe}_3\text{C}$  dapat dilihat pada Gambar 2.4.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA



**Gambar 2.4** Diagram fasa Fe- Fe<sub>3</sub>C (Avner, 1974)

Dari Gambar 2.4 tampak bahwa diagram fasa ini memiliki tiga garis mendatar yang menandakan adanya reaksi yang berlangsung secara *isothermal*, yaitu:

- Pada 1496°C, kadar karbon antara 0.10 – 0.50 %, berlangsung reaksi peritektik.  $L + \delta \rightarrow \gamma$  (daerah ini tidak begitu penting untuk dunia teknik)
- Pada 1130°C, kadar karbon antara 2,0 – 6,67 %, berlangsung reaksi eutektik.  $L \rightarrow \gamma + \text{Fe}_3\text{C}$
- Pada 723°C, kadar karbon antara 0.025 – 6.67 %, berlangsung reaksi *eutectoid*.  $\gamma \rightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$  (Avner, 1974)

Pada keadaan yang ekuilibrium, karbon akan berupa karbon bebas (grafit), sehingga akan diperoleh diagram kesetimbangan besi-grafit. Namun perubahan-perubahan dalam keadaan ekuilibrium berlangsung terlalu lama. Seharusnya karbida besi akan terjadi pada temperatur kamar (pada temperatur sekitar 700°C pun perubahan ini akan memakan waktu bertahun-



tahun). Dalam hal ini karbida besi dikatakan sebagai suatu struktur yang metastabil.

## 2.5 Besi Tuang (*Cast Iron*)

Secara umum, besi tuang merupakan bagian dari paduan besi dengan kadar karbon di atas 2,14%. Sebagian besar besi tuang mengandung antara 3,0-4,5% karbon, dengan tambahan beberapa unsur paduan (Callister, 2010). Besi tuang memiliki keuletan yang rendah, sehingga sulit untuk di-*machining*. Satu-satunya cara pembuatannya adalah dengan penuangan, karena itu disebut besi tuang. Penggunaan besi tuang cukup luas walaupun keuletannya lebih rendah dari baja, karena besi tuang memiliki beberapa sifat khusus yang berguna. Terutama jika dipadukan dengan unsur-unsur yang lain dengan perlakuan panas yang tepat.

Menurut Sidney H. Avner (1974) secara umum besi tuang dikelompokkan menjadi:

- Besi tuang putih (*white cast iron*), di mana seluruh karbon berupa sementit.
- Besi tuang mampu tempa (*malleable cast iron*), di mana karbonnya berupa *temper* karbon, dengan matriks perlitik atau ferritik.
- Besi tuang kelabu (*grey cast iron*), di mana karbonnya berupa grafit berbentuk *flake* (serpih) dengan matriks ferritik atau perlitik.
- Besi tuang nodular (*nodular cast iron*), di mana karbonnya berupa grafit nodular dengan matriks ferritik atau perlitik.

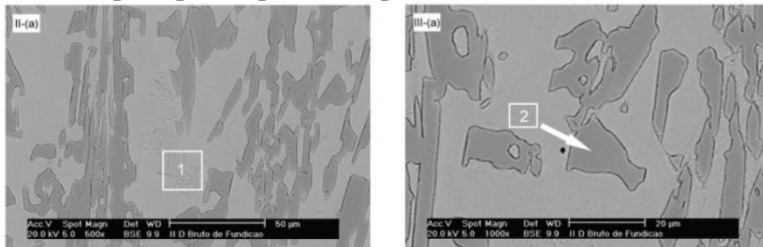
### 2.5.1 Besi Tuang Putih (*White Cast Iron*)

Pada besi tuang putih, kadar karbon normalnya untuk kondisi *unalloyed* atau *low alloy* berkisar antara 2,2-3,6% (ASM Handbook Vol. 1, 1991). Besi tuang putih bersifat keras dan merupakan paduan yang getas dengan banyaknya kandungan  $\text{Fe}_3\text{C}$ . Struktur mikro dari besi tuang putih dapat dilihat pada Gambar 2.5. Bagian yang ditunjukkan oleh angka 1 merupakan fasa austenit, sedangkan angka 2 menunjukkan fasa  $\text{Fe}_3\text{C}$ .

---

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Permukaan yang patah dari material ini akan berwarna putih, sesuai dengan namanya. Kelompok besi tuang putih dengan kandungan paduan yang tinggi dibuat untuk memanfaatkan sifat kekerasan dan ketahanan ausnya. Unsur paduan yang ditambahkan di antaranya adalah kromium, nikel, dan molibdenum. Dengan penambahan unsur paduan tersebut karbida akan terbentuk pada saat proses solidifikasi, dan martensit akan terbentuk pada proses perlakuan panas. (Askeland, 2010)

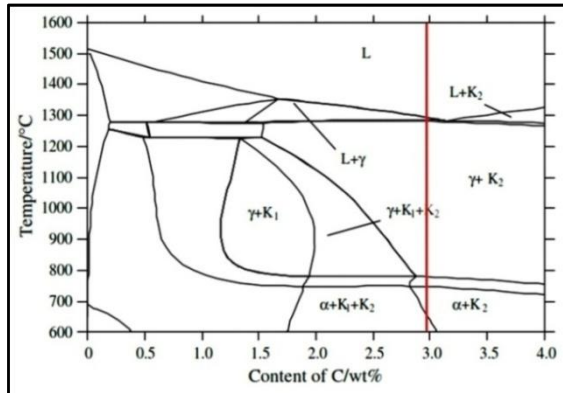


**Gambar 2.5** Struktur mikro besi tuang putih (Ortega-Cubillos, 2015)

### 2.5.2 High Chromium White Cast Iron

Kandungan karbon yang normal untuk *high chromium white cast iron* adalah mulai 2,2% untuk komposisi eutektik, sekitar 3,5% untuk 15% Cr dan 2,7% untuk 27% Cr (ASM Handbook Vol. 1, 1991). *High chromium white cast iron* memiliki sifat ketahanan abrasi yang sangat baik sehingga dimanfaatkan untuk material *slurry pumps*, *brick molds*, *coal-grinding mills*, *rolling mill rolls*, peralatan *shot blasting*, komponen *quarrying*, serta *hard rock mining* dan *milling*. Dalam beberapa aplikasi, material ini juga diharapkan mampu menahan beban *impact* yang tinggi. Paduan ini diakui memiliki perpaduan yang baik untuk sifat keuletan dan ketahanan abrasi.





**Gambar 2.6** Diagram fasa ekuilibrium *high chromium white cast iron* dengan kadar kromium 25% (Li, et al, 2009)

Berdasarkan kandungan karbon dan kromium, maka struktur mikro dari *high chromium white cast iron* dikelompokkan menjadi tiga jenis, yaitu: *eutectic alloys*, *hypoeutectic alloys*, dan *hypereutectic alloys* (Nurjaman, 2012). Material liner yang mengalami kegagalan termasuk dalam kelompok *high chromium white cast iron* dengan kandungan karbon sebanyak 2,99% dan kromium sebanyak 25,2%. Karena komposisi yang dimiliki, material tersebut termasuk ke dalam kelompok *hypoeutectic alloys*. Pada struktur *hypoeutectic alloys*, kandungan karbon lebih rendah dari titik eutektik. Proses solidifikasi diawali dengan pembentukan dendrit dari matriks (austenit) pada rentang temperatur solidifikasi tertentu hingga mencapai temperatur eutektik. Kemudian proses berlanjut dengan pembentukan struktur eutektik. (Nurjaman, 2012). Reaksi eutektik yang terjadi ialah  $L \rightarrow \gamma + M_7C_3$ . Walaupun sementit secara otomatis hilang karena tingginya kadar kromium pada *high chromium white cast iron*, sejumlah sementit masih mungkin untuk terbentuk (Cobos, et al, 2015). Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 2.6 yang merupakan gambar diagram fasa ekuilibrium dari *high chromium white cast irons* yang dihitung dengan menggunakan *Thermo-Calc Software*.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA



*High chromium white cast iron* mengalami beberapa reaksi solidifikasi dan berbagai macam reaksi transformasi pendinginan hingga temperatur kamar, serta selama pemanasan kembali pada temperatur tertentu di bawah garis solidus. Sehingga terdapat beberapa fasa yang berbeda pada jenis material ini yang mempengaruhi sifat mekaniknya. Berikut beberapa reaksi transformasi yang telah diteliti yang terjadi pada *high chromium white cast iron*:

- a. Dendrit austenit primer pada paduan hipoeutektik.
- b. Karbida  $M_7C_3$  primer pada paduan hipereutektik.
- c. Karbida eutektik dan austenit pada paduan hipoeutektik dan hipereutektik.
- d. Karbida peritektik pada paduan hipereutektik
- e. Presipitasi karbida sekunder saat pendinginan lambat setelah solidifikasi atau saat proses penuaan pada temperatur tertentu.
- f. Perlit yang terdiri dari karbida lamelar dan ferit saat pendinginan lambat.
- g. Dekomposisi austenit menjadi martensit saat pendinginan.
- h. Transformasi martensit temper menjadi ferit pada proses pemanasan kembali.
- i. Transformasi austenit sisa menjadi ferit pada proses pemanasan kembali.
- j. Transformasi ferit menjadi austenit pada proses pemanasan kembali.
- k. Disolusi perlit menjadi austenit pada proses pemanasan kembali.
- l. Disolusi karbida sekunder saat pemanasan kembali pada temperature ekstrim.

(Hinckley, et al, 2008)

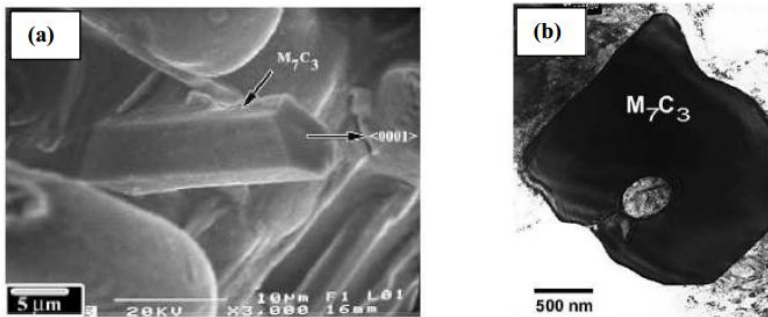
Salah satu sifat mekanik yang dipengaruhi oleh fasa yang terbentuk pada *high chromium white cast irons* adalah kekerasan. Tabel 2.5 berikut menunjukkan perbandingan kekerasan dari setiap fasa pada *high chromium white cast irons*.



**Tabel 2.5** Perbandingan Kekerasan Fasa yang Terbentuk pada  
*High Chromium White Cast Iron* (Kopycinski, 2014;  
Wiengmoon, 2011)

Fasa	Struktur Kristal	Nilai Kekerasan (HV)
Austenit	FCC	210
Perlit	-	265
Martensit	Tetragonal	940
Bainit	-	660
M <sub>3</sub> C	Ortorombik	800-1100
M <sub>6</sub> C	FCC	1200-1800
M <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	Hexagonal	1000-1800
M <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	FCC	1000

Salah satu contoh dari bentuk struktur kristal karbida yang terbentuk pada *high chromium white cast iron* terdapat pada Gambar 2.7 berikut.



**Gambar 2.7** (a) Hasil SEM *high chromium white cast iron* yang menunjukkan bentuk *hexagonal rod* (b) Hasil TEM rongga pada karbida yang diisi oleh matriks (Nurjaman, 2012)

Karbida pada *high chromium white cast irons* sangat keras, getas, dan memiliki ketahanan aus yang baik. *ASM Handbook Vol. 4, 1991*). Karbida

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

## 2.6 Analisis Kegagalan

Analisis kegagalan adalah proses dalam menentukan penyebab fisis yang menyebabkan suatu permasalahan (*ASM Handbook Vol. 11, 1991*). Dalam *ASM Handbook Vol. 11, 1991* kegagalan material secara fisis dapat dikategorikan menjadi satu dari sekian banyak sistem klasifikasi sebagai berikut.

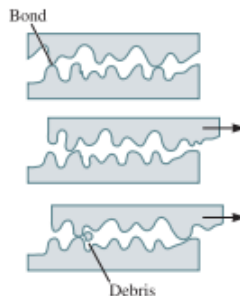
- a. Distorsi atau deformasi yang tidak diinginkan
- b. *Fracture*
- c. Korosi
- d. *Wear*

Keempat kategori di atas mewakili bentuk umum dari kegagalan material, dan setiap bentuk kegagalan tersebut memiliki mekanismenya masing-masing.

### 2.6.1 *Wear* (keausan)

#### a. *Adhesive Wear*

Perilaku ini terjadi apabila dua permukaan benda padat bergesekan antara satu dengan yang lain dengan tekanan. Permukaan akan terdeformasi secara plastis hingga bahkan tergerus bersama. Mekanisme terjadinya *adhesive wear* ditunjukkan pada Gambar 2.8.



**Gambar 2.8** Mekanisme *adhesive wear* (Askeland, 2010)

Banyak hal yang dapat dilakukan untuk meningkatkan ketahanan aus dari material. Di antaranya yaitu mendesain komponen sehingga meminimalisir beban yang diterima, menghaluskan permukaan, dan pelumasan secara berkala. Selain



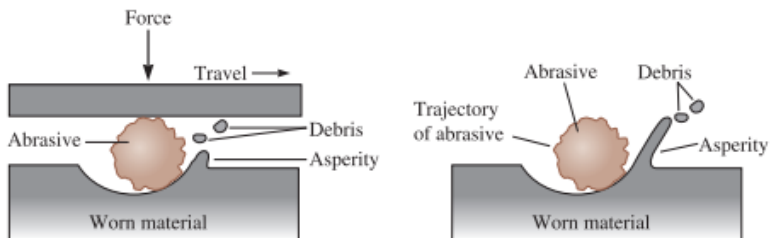
itu, sifat dan struktur mikro dari material juga penting. Jika kedua permukaan material memiliki kekerasan yang tinggi, maka laju keausan akan rendah. Material keramik dengan kekerasan yang tinggi akan memiliki ketahanan aus adhesif yang baik.

### ***b. Abrasive Wear***

Apabila material pada permukaan berkurang akibat kontak dengan material yang keras, maka akan terjadi keausan abrasif (Askeland, 2010). Menurut Gagg (2006), ketika suatu permukaan material lebih keras dibanding material yang lain, akan terdapat dua cara pengurangan material, yaitu:

- a. Ketika material abrasif memiliki geometri tertentu, saat itu material dapat menjadi suatu “alat pemotong” yang mereduksi material dengan menghasilkan geram yang baik.
- b. Partikel-partikel kecil yang keras dan tajam (seperti debu atau partikel keras dari proses mesin tertentu) mengabrasi permukaan material yang lain.

Jenis keausan ini sering terjadi pada komponen mesin seperti *crusher* dan *grinder*. Material yang memiliki kekerasan yang tinggi, ketangguhan yang baik, serta kekuatan yang tinggi akan memiliki sifat ketahanan aus abrasif yang baik. Mekanisme *abrasive wear* ditunjukkan pada Gambar 2.9.



**Gambar 2.9** Mekanisme *abrasive wear* (Askeland, 2010)

Sebagai gambaran, kekerasan dari beberapa material abrasif dapat dilihat pada Tabel 2.5 berikut ini.



**Tabel 2.6** Nilai Kekerasan dari Beberapa Material Abrasif  
(Wiengmoon, 2011)

Material abrasive	Nilai Kekerasan (HV)
SiC	2600
VC	2000-3000
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1800
Silika	1430
Martensit karbon tinggi	500-1010

Jenis material yang biasa digunakan untuk aplikasi ketahanan aus abrasif biasanya adalah baja dengan perlakuan panas *quenching* dan *tempering*; baja dengan pengerasan permukaan; material komposit; besi tuang putih; dan material dengan permukaan keras yang diproduksi dengan pengelasan. Material keramik juga memiliki ketahanan aus yang baik karena kekerasannya yang tinggi. Namun, sifat getas yang dimiliki terkadang membatasi penggunaannya dalam aplikasi keausan abrasif.

### c. Erosi oleh Cairan

Fenomena ini disebabkan oleh tekanan yang tinggi dari liquid yang bergerak. Liquid tersebut menyebabkan *strain hardening* pada permukaan material, yang memicu terjadinya deformasi terlokalisasi, retakan, dan hilangnya berkurangnya sejumlah volume material. (Askeland, 2010)

## 2.6.2 Analisis Keausan sebagai Mekanisme Kegagalan

Analisis yang sesuai pada kegagalan aus dapat diperkirakan dari berbagai faktor baik secara makroskopik maupun mikroskopik. Ada tiga metode umum untuk mengidentifikasi tipe umum dari mekanisme aus, yakni sebagai berikut.

### a. Pengamatan pada material abrasif:

- Partikel yang menggumpal merupakan indikasi *adhesive wear*.
- Partikel yang halus merupakan indikasi *oxidative wear*.



- Partikel seperti geram merupakan indikasi *abrasive wear*.
- Partikel seperti *flake* merupakan indikasi *delamination wear*.
- b. Pengamatan pada permukaan yang terabrasi:
  - Adanya robekan mengindikasikan *adhesive wear*.
  - Adanya goresan mengindikasikan *abrasive wear*.
  - Adanya daerah yang mengkilap mengindikasikan *non-adhesive wear*.
  - Terlihatnya struktur mikro dari material mengindikasikan terjadinya *chemical/corrosive wear*.
- c. Pengamatan metalografi pada permukaan dan sub permukaan untuk mengetahui tipe deformasi mikrostruktur yang disebabkan oleh proses abrasi:
  - Distorsi sub-permukaan terlokalisasi pada struktur mikro merupakan indikasi terjadinya deformasi plastis dari kondisi *overload*.
  - Terjadinya *work hardening* pada permukaan material merupakan indikasi terjadinya *delamination wear*.
  - Munculnya retakan pada sub-permukaan merupakan indikasi terjadinya *fatigue/fretting wear*.
  - Munculnya delaminasi merupakan indikasi dari keausan karena *rolling* atau *sliding contact*. (Gagg, 2006)

## 2.7 Perlakuan Panas (Heat Treatment)

Berdasarkan *ASM Handbook Vol.4*, 1991, perlakuan panas merupakan kombinasi dari proses pemanasan dan pendinginan dalam waktu tertentu yang diaplikasikan pada paduan logam dalam keadaan solid untuk memperoleh sifat-sifat yang diinginkan.

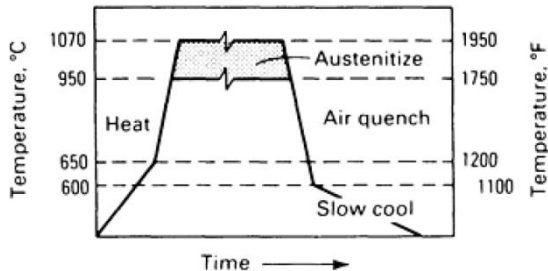
### 2.7.1 Pengerasan (*Hardening*)

Pengerasan biasanya dilakukan untuk memperoleh sifat tahan aus yang tinggi, dan/atau kekuatan dan *fatigue limit/strength* yang lebih baik. Pengerasan dilakukan dengan memanaskan baja ke daerah austenit lalu mendinginkannya

---

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

dengan cepat. Dengan pendinginan cepat ini terbentuk martensit, yang keras. Setelah pengerasan baja akan menjadi keras dan getas, karena itu pengerasan selalu diikuti dengan penemperan. (Avner, 1974)



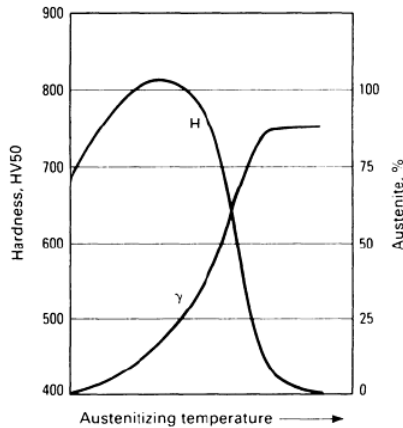
**Gambar 2.10** Skema perlakuan panas untuk pengerasan *high chromium white cast irons* (ASM Handbook Vol. 4, 1991)

Pada *high chromium white cast irons*, hasil optimal diperoleh dengan terbentuknya struktur martensit setelah perlakuan panas. Sifat ketangguhan dan ketahanan abrasi dapat ditingkatkan dengan perlakuan panas membentuk struktur martensit. (ASM Handbook Vol. 4, 1991). Gambar 2.10 menunjukkan contoh skema perlakuan panas untuk pengerasan *high chromium white cast irons*.

### 2.7.2 Austenitisasi

Pada proses austenitisasi, baja dipanaskan sampai daerah austenit ( $\gamma$ ) dan ditahan selama beberapa waktu tertentu untuk melarutkan karbida sampai menjadi larutan padat austenit. Untuk *high chromium white cast irons*, unsur kromium yang terlarut dalam austenit pada kondisi *as cast* bereaksi dengan karbon pada temperatur austenitisasi, menyebabkan terjadinya pembentukan karbida kromium baru ( $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ) atau karbida sekunder (Jacuinde, et al, 2003). Pada paduan material ini terdapat temperatur austenitisasi optimal untuk mencapai kekerasan yang maksimal dengan berbagai komposisi, seperti terlihat pada Gambar 2.11.





**Gambar 2.11** Pengaruh temperatur austenitisasi pada kekerasan (H) dan austenit sisa ( $\gamma$ ) pada *high chromium white cast iron* (ASM Handbook Vol. 4, 1991)

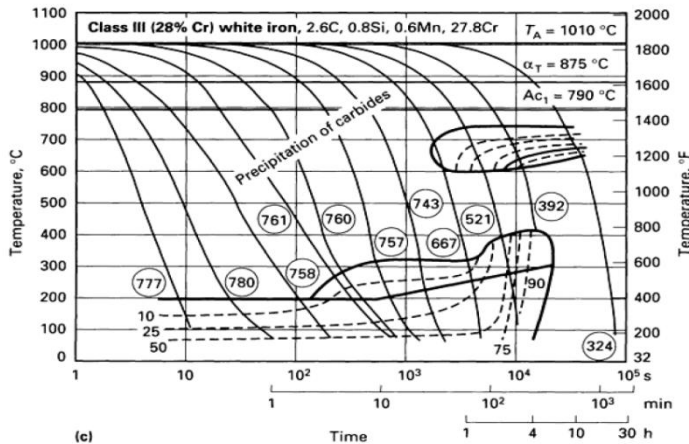
Temperatur austenitisasi menentukan banyaknya karbon yang tersisa dalam austenit. Temperatur yang terlalu tinggi meningkatkan kestabilan dari austenit, dan semakin tinggi austenit sisa yang ada akan mengurangi kekerasan. (ASM Handbook Vol. 4, 1991)

### 2.7.3 Pendinginan (*Quenching*)

Untuk mencapai struktur martensit (yang dituju dalam melakukan pengerasan) maka austenit yang sudah diperoleh harus didinginkan cukup cepat, setidaknya dapat mencapai laju pendinginan kritis dari baja yang bersangkutan. Dalam melakukan pendinginan ini maka benda kerja biasanya dicelupkan ke dalam suatu media pendingin yang berupa *liquid*. Walaupun ada juga jenis baja yang dapat dikeraskan dengan pendinginan di udara. Selama proses ini, panas dari benda kerja akan mengalir ke dalam media pendingin, sehingga temperatur benda kerja akan turun. Laju penurunan temperatur ditentukan oleh kecepatan aliran panas tersebut. (Avner, 1974) Untuk *high chromium white cast*



irons, diagram *Continuous Cooling Transformation* (CCT) dapat dilihat pada Gambar 2.12.



**Gambar 2.12** Diagram CCT untuk *class III (28% Cr) white cast iron* yang mengandung 2,6% C, 0,8% Si, 0,6% Mn, dan 27,8% Cr (*ASM Handbook Vol. 4, 1991*)

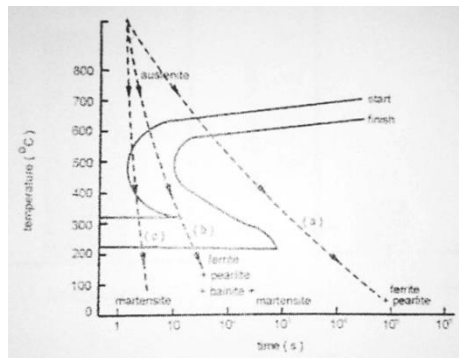
#### 2.7.4 Tempering

*Tempering* bertujuan untuk mengembalikan sifat ketangguhan material setelah diberi perlakuan *quenching* dan juga untuk menghilangkan tegangan sisa yang timbul akibat proses *quenching* tersebut. Tegangan sisa ini akan terus terakumulasi terutama saat pemakaian dalam aplikasi pembebanan, sehingga akan menimbulkan retak hingga terjadinya perpatahan (Nurjaman, 2012). Pada *high chromium white cast iron*, disarankan untuk melakukan *tempering* pada temperatur antara 200-230 °C (400-450 °F) selama 2 sampai 4 jam untuk mengembalikan sedikit ketangguhan dalam struktur martensit, serta untuk menghilangkan tegangan sisa. (*ASM Handbook Vol. 4, 1991*)



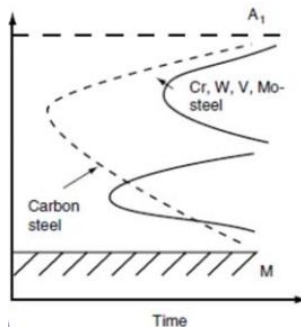
### 2.7.5 Pengaruh Unsur Paduan terhadap Proses Perlakuan Panas

Dalam membicarakan pengaruh unsur paduan kromium terhadap baja di sini dititik beratkan pada pengaruhnya terhadap beberapa hal yang menyangkut perlakuan panas. Sebagai acuan awal, berikut merupakan diagram TTT dari besi tuang yang ditunjukkan oleh Gambar 2.13.



**Gambar 2.13** Diagram TTT besi tuang (Avner, 1974)

Semua unsur paduan kecuali kobalt (Co) akan menurunkan temperatur awal pembentukan martensit ( $M_s$ ) dan temperatur akhir pembentukan martensit ( $M_f$ ). Selain itu juga menghambat terjadinya transformasi austenit menjadi ferit/sementit, sehingga akan menggeser kurva transformasi ke kanan. Ini berarti unsur paduan menurunkan laju pendinginan kritis. Unsur paduan pembentuk karbida (seperti Cr, Mo, W, V, dll) menghambat pembentukan perlit, menggeser kurva transformasi perlit ke kanan atas, tetapi mempercepat pembentukan bainit, menggeser kurva bainit ke kiri bawah, sehingga kedua kurva terpisah satu sama lain, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.14.



**Gambar 2.14** Pengaruh unsur paduan pembentuk karbida (Avner, 1974)

Pada umumnya semua unsur paduan akan menyebabkan terhambatnya dekomposisi martensit bila dipanaskan kembali. Hal ini berarti akan menghambat terjadinya penurunan kekerasan akibat pemanasan kembali (*tempering*). Unsur pembentuk karbida dalam jumlah banyak akan memberikan *secondary hardness* pada baja saat ditemper, yaitu kenaikan kekerasan pada temperatur *tempering* tertentu. (Avner, 1974)

## 2.8 Pengujian

### 2.8.1 Pengujian Kekerasan

Pada umumnya, kekerasan menyatakan ketahanan terhadap deformasi dan merupakan ukuran ketahanan logam terhadap deformasi plastik atau deformasi permanen (Dieter, 1987). Hal ini sering diartikan sebagai ukuran kemudahan dan kuantitas khusus yang menunjukkan nilai kekerasan material. Pada pengujian kekerasan terdapat tiga jenis ukuran kekerasan, hal ini tergantung pada cara melakukan pengujian, yaitu:

1. Kekerasan goresan (*scratch hardness*),
2. Kekerasan lekukan (*indentation hardness*),
3. Kekerasan pantulan (*rebound*)

Pengujian yang sering dilakukan pada logam adalah pengujian kekerasan indentasi. Pada model ini kekerasan suatu material diukur terhadap tahanan plastis dari permukaan suatu



material komponen konstruksi mesin dengan spesimen standart terhadap *indentor*. Terdapat berbagai macam uji kekerasan indentasi, antara lain: uji kekerasan *Brinell*, *Vickers*, *Rockwell* dan *Knoop*.

Pengujian kekerasan dengan metode *Vickers* menggunakan indentor berupa *diamond* yang berbentuk piramida dengan sudut  $136^\circ$ . Indentor *diamond* ditekan pada permukaan material sehingga dapat dilihat jejak berupa belah ketupat pada permukaan material. Nilai kekerasan *Vickers* dapat diperoleh dari rumus:

$$HV = \frac{2P \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{d^2} = \frac{1.854P}{d^2} \quad (2.1)$$

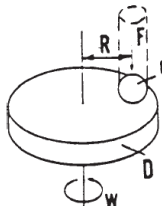
P = beban (kg)

d = rata-rata panjang diagonal (mm)

$\theta = 136^\circ$

### 2.8.2 Pengujian Ketahanan Aus

Pengujian ini mengacu pada ASTM G99 mengenai metode pengujian standar untuk keausan dengan peralatan *pin-on-disk*. Pengujian ini mencakup prosedur laboratorium untuk menentukan dan memperkirakan keausan material akibat gesekan. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar berikut.



NOTE 1— $F$  is the normal force on the pin,  $d$  is the pin or ball diameter,  $D$  is the disk diameter,  $R$  is the wear track radius, and  $w$  is the rotation velocity of the disk.

**Gambar 2.15** Skema pengujian ketahanan aus dengan metode *pin on disk* (ASTM G99, 2003)

Gambar 2.15 menunjukkan gambar skema dari pengujian ketahanan aus menggunakan sistem *pin-on-disk*. Ada beberapa sistem yang biasa digunakan untuk sistem *ini*, antara lain poros

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA



yang bergerak dan penjepit untuk menahan *disk* yang berputar, tuas untuk menahan pin, serta alat tambahan untuk menempatkan beban yang diberikan pada pin.

Pengujian ini dapat diaplikasikan pada berbagai jenis material, salah satu ketentuan yang dibutuhkan adalah spesimen memiliki dimensi tertentu yang dapat di persiapkan dan dapat menahan tekanan yang diberikan selama pengujian tanpa mengalami kegagalan. Bentuk pin secara khusus berbentuk silinder atau bola, dengan diameter antara 2-10 mm dan ukuran *disk* antara 30-100 mm, serta memiliki ketebalan dari 2-10 mm.

Ada beberapa parameter dalam pengujian ini. Yang pertama adalah *load* atau nilai dari gaya yang diberikan pada pin terhadap *disk* dalam satuan Newton. *Speed*, yaitu kecepatan pergeseran dari permukaan dari *pin* dan *disk* yang bersentuhan dalam meter per detik. *Distance*, merupakan jarak yang di tempuh selama pengujian berlangsung dalam meter. *Temperatur*, yang spesifik pada lokasi dekat persentuhan antara *pin* dengan *disk*. Dan lingkungan yang dapat mempengaruhi pengujian ini (ASTM G99, 2003).

Setelah melakukan pengujian, apabila dalam alat pengujian tidak terdapat suatu pencatat otomatis yang dapat langsung mengeluarkan hasil, maka harus dilakukan perhitungan. Hasil awal yang didapat dari pengujian adalah *mass loss* berdasarkan perhitungan selisih antara massa awal dan massa akhir. Agar data yang diperoleh dapat berupa jumlah keausan per satuan waktu, maka dapat digunakan rumus sebagai berikut.

$$\text{Mass loss per satuan waktu} = \frac{\text{massa awal} - \text{massa akhir}}{\text{waktu material terekspos}} \quad (2.2)$$

$$\text{Volume loss per satuan waktu} = \frac{\text{mass loss} / \text{massa jenis}}{\text{waktu material terekspos}} \quad (2.3)$$

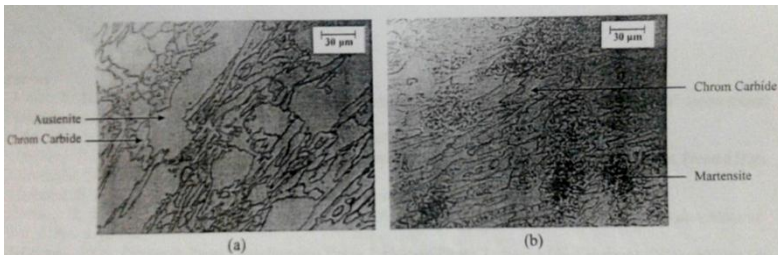
$$\text{Thickness loss per satuan waktu} = \frac{\text{volume loss} / \text{luas permukaan}}{\text{waktu material terekspos}} \quad (2.4)$$



## 2.9 Penelitian Sebelumnya

### 2.9.1 *Effect of Thermal Hardening on Hardness and Microstructure of High Chromium White Cast Iron*

Dalam penelitian ini, perlakuan panas diberikan pada *high chromium white cast iron*. Penelitian ini akan menginvestigasi pengaruh *thermal hardening* pada kekerasan dan struktur mikro dari *high chromium white cast iron* dengan komposisi 2,8% C; 22% Cr; 2,8% Ni dengan temperatur austenitisasi 950 °C selama 5 jam, diikuti dengan pendinginan dengan media oli dan penemperan pada temperatur 250 °C, 300 °C, dan 350 °C. Pengujian yang dilakukan adalah pengujian kekerasan dengan metode *Brinell* dan pengujian dengan mikroskop optik untuk menganalisis struktur mikro yang terbentuk. Hasil dari penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 2.16.

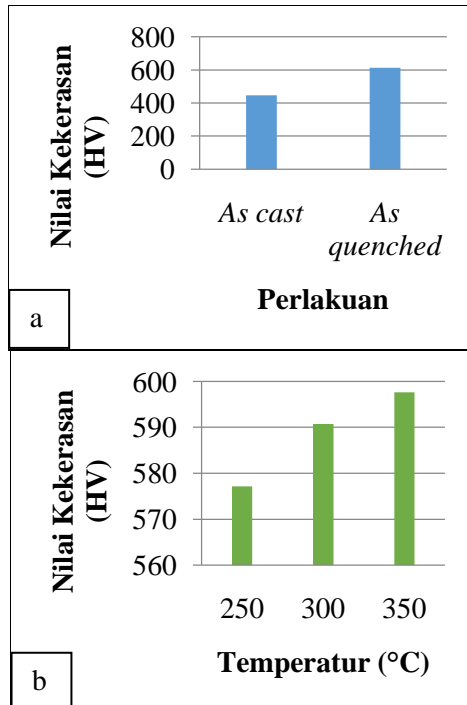


**Gambar 2.16** Struktur mikro *high chromium white cast iron* (a) *as cast* (b) *as quench* (Bahfie, 2015)

*Internal stress* yang diakibatkan oleh perlakuan *quenching* menyebabkan material menjadi keras dan getas. Proses *tempering* dapat menghilangkan *internal stress* yang ditandai dengan menurunnya kekerasan. Pada Gambar 2.17 (b), kekerasan meningkat dengan meningkatnya temperatur *tempering*. Hal ini dikarenakan difusi karbida yang berukuran kecil ke karbida kasar, untuk lebih jelasnya pada Gambar 2.18 (a). Karbida kasar bersifat keras dan getas. *Tempering* pada temperatur 300 °C, seperti pada Gambar 2.18 (b) karbida eutektik kecil mengalami pertumbuhan memanjang dan berdifusi dengan karbida yang lain pada



temperatur 350 °C (Gambar 2.18 (c)). Semakin tinggi temperatur, semakin tinggi laju difusi dari karbida kromium.



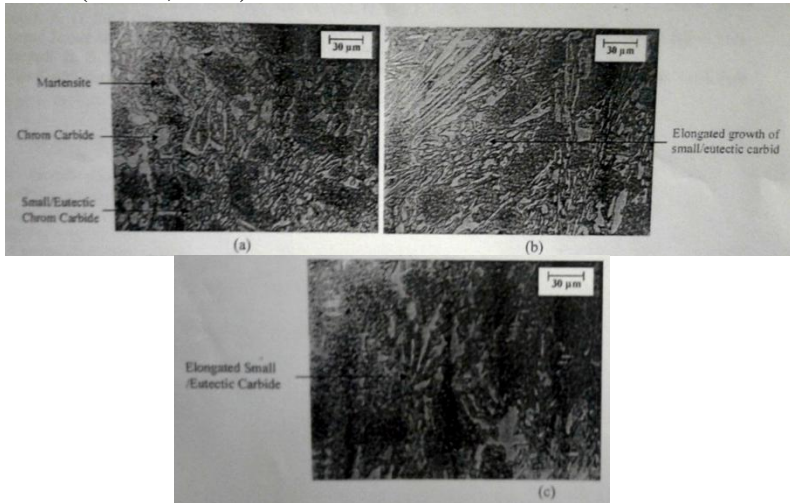
**Gambar 2.17** Nilai kekerasan *high chromium white cast iron* 2,8% C; 22% Cr; 2,8% Ni (a) *as-cast* dan setelah di-*quenching* (b) *tempering* dengan temperatur yang berbeda (Bahfie, 2015)

Kekerasan dari *high chromium white cast iron* dapat diperbaiki dengan melakukan proses *hardening*. Kekerasan terbaik sebesar 597,65 HV yang diperoleh dengan pemanasan material hingga temperatur 950 °C selama 5 jam dan pendinginan cepat dengan media oli, kemudian dilakukan *tempering* pada temperatur 350 °C. Karbida kromium dan martensit berpengaruh pada kekerasan. Dengan meningkatkan temperatur *tempering* di





atas 250 °C, struktur mikro dari karbida kromium menjadi lebih kasar. (Bahfie, 2015)



**Gambar 2.18** Struktur mikro *high chromium white cast iron* dengan variasi temperatur (a) 250 °C, (b) 300 °C, dan (c) 350 °C (Bahfie, 2015)

### 2.9.2 Karakteristik Struktur Mikro dan Sifat Mekanik Besi Tuang Putih Paduan Krom Tinggi Hasil *Thermal Hardening* untuk Aplikasi *Grinding Ball*

*Type II-A* adalah jenis material *high chromium white cast iron* dengan kandungan karbon 2,3% dan kromium lebih dari 13,3%. Umumnya ASTM A532 *Type II-A* banyak digunakan sebagai *grinding ball*. Pada studi penelitian ini, proses perlakuan panas berupa *thermal hardening* dilakukan terhadap material ASTM A532 *Type II-A* untuk meningkatkan kekerasannya. Proses *quenching* menggunakan dua media *quenching* yang berbeda, yaitu oli dan udara paksa (udara ditiupkan secara langsung dari *fan*), sedangkan proses *tempering* dilakukan pada temperatur yang bervariasi yaitu 250 °C, 300 °C, dan 350 °C.

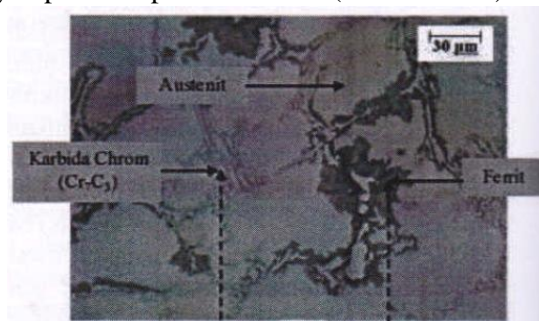
## BAB II TINJAUAN PUSTAKA



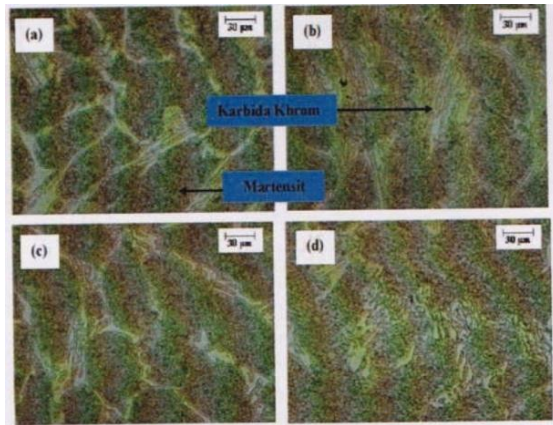
**Tabel 2.1** Nilai Kekerasan Material pada Berbagai Media *Quenching* dan Variasi Temperatur *Tempering* (Astuti, 2015)

Jenis Perlakuan	Rata-rata Kekerasan (HV)	
<i>As-cast</i>	435	
Media <i>Quenching</i>	Oli	Udara Paksa
<i>As-quenched</i>	705,625	657,42
<i>Tempering</i> 250 °C	746	683,2
<i>Tempering</i> 300 °C	800	641
<i>Tempering</i> 350 °C	748,8	601,35

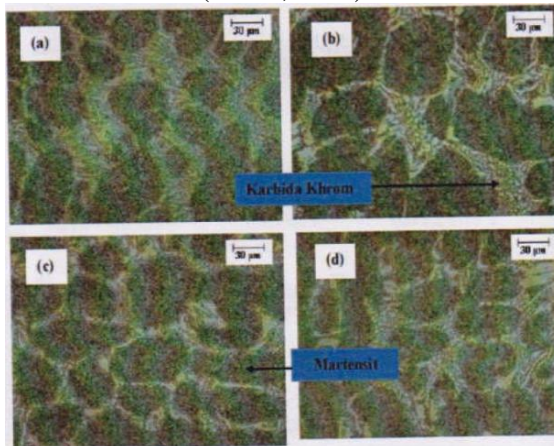
Pada Tabel 2.8 dapat dilihat bahwa pada kondisi *as-cast* nilai kekerasannya sebesar 435 HV. Struktur yang terbentuk pada kondisi *as-cast* berupa matriks austenit, ferrit, dan karbida krom sepanjang batas butir austenit, seperti pada Gambar 2.19. Pada proses perlakuan panas dengan media pendingin oli dan variasi temperatur *tempering*, kekerasan optimal yang dicapai adalah dengan temperatur *tempering* 300 °C yaitu sebesar 800 HV. Hal ini dikarenakan pada struktur mikronya terbentuk karbida krom yang lebih kasar, walaupun jumlah karbida krom tampak sedikit lebih banyak pada temperatur 250 °C (Gambar 2.20).



**Gambar 2.19** Struktur mikro material ASTM A532 *type II-A* dengan mikroskop optik pada kondisi *as-cast* (Astuti, 2015)



**Gambar 2.20** Struktur mikro material ASTM A532 type II-A dengan media pendingin oli pada kondisi (a) *as-quenched* (b) *tempering 250 °C* (c) *tempering 300 °C* (d) *tempering 350 °C* (Astuti, 2015)



**Gambar 2.21** Struktur mikro material ASTM A532 type II-A dengan media pendingin udara paksa pada kondisi (a) *as-quenched* (b) *tempering 250 °C* (c) *tempering 300 °C* (d) *tempering 350 °C* (Astuti, 2015)



---

Untuk proses perlakuan panas dengan media pendingin udara paksa dan variasi temperatur *tempering*, kekerasan optimal yang dicapai adalah dengan temperatur *tempering* 250 °C yaitu sebesar 683,2 HV karena memiliki jumlah karbida yang paling besar dibanding temperatur *tempering* yang lain. Lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 2.21.

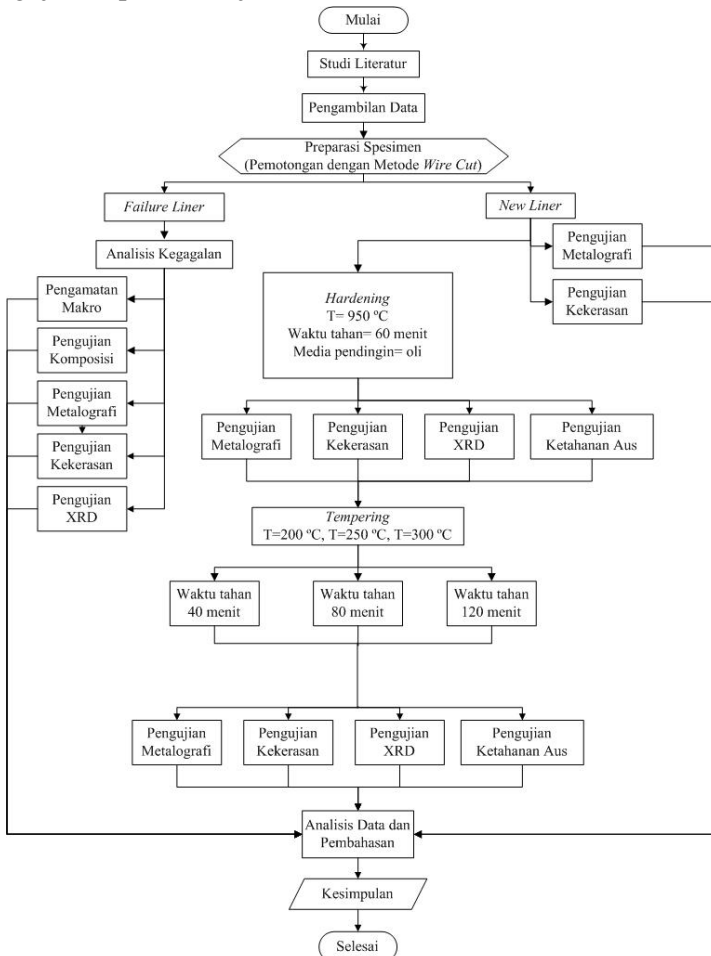


*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Diagram Alir Penelitian

Dalam pelaksanaan penelitian ini dilakukan beberapa pengujian seperti ditunjukkan oleh Gambar 3.1 berikut.



**Gambar 3.1** Diagram alir penelitian



### 3.2 Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian kali ini di antaranya adalah studi lapangan, pengujian, dan studi literatur. Adapun penjelasan dari masing-masing metode adalah sebagai berikut.

1. Studi Lapangan

Metode ini dilakukan dengan pencarian informasi terkait komponen yang akan diteliti beserta informasi tentang kegagalan yang terjadi pada komponen tersebut dengan cara terjun ke lapangan yaitu PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk, dan berdiskusi dengan pembimbing dan pihak PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk yang ahli di bidangnya.

2. Studi Literatur

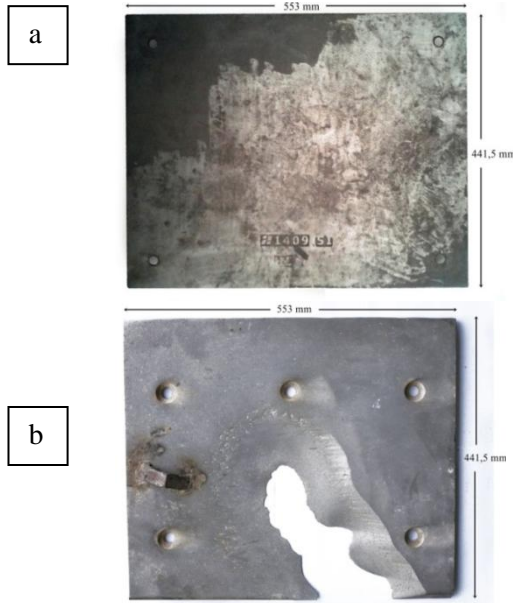
Metode ini dilakukan dengan pencarian literatur berupa buku-buku, jurnal-jurnal penelitian, dan situs industri yang menyediakan informasi tentang permasalahan yang akan diteliti.

3. Pengujian

Metode ini dilakukan dengan pengujian material sesuai dengan prosedur dan metode yang ada. Adapun pengujian yang diperlukan dalam penelitian ini yaitu: pengujian komposisi, pengujian kekerasan, pengujian metalografi, pengujian abrasi, serta pengujian XRD.

### 3.3 Material yang digunakan

Pada bulan Desember 2016 ditemukan material *chute inlet feed liner* pada *vertical roller mill* Pabrik Tuban IV yang mengalami kegagalan berupa aus yang terlihat seperti pada gambar 3.2 bagian (a). Sementara untuk material *liner* yang baru dan belum terpasang terlihat seperti pada gambar 3.2 bagian (b).



**Gambar 3.2** (a) *New liner* (b) *Failure liner*

Material *liner* yang mengalami kegagalan dianalisis untuk mengetahui penyebab terjadinya kegagalan. Sementara material *liner* baru diberi perlakuan panas sebagai salah satu solusi untuk mencegah terjadinya kegagalan serupa pada *chute inlet feed liner*.

### 3.4 Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

1. Kamera *Canon SLR EOS 1100D*  
Digunakan untuk mengambil gambar secara makro dan sebagai dokumentasi selama penelitian.
2. Mistar  
Digunakan untuk mengukur material uji





**Gambar 3.3** Kamera DSLR

3. Mesin *Wire Cut*  
Digunakan untuk memotong material uji menjadi bagian yang lebih kecil.



**Gambar 3.4** Mesin *wire cut*

4. Mesin OES (*Optical Emission Spectroscopy*) *Foundry Master Pro*  
Digunakan untuk mengetahui komposisi material uji.



**Gambar 3.5** Mesin OES (*Optical Emission Spectroscopy*)



5. *Dielectric Heating Furnace*

Digunakan untuk melakukan proses perlakuan panas pada material uji.



**Gambar 3.6** *Furnace*

6. Mesin Uji Kekerasan *Universal Hardness Tester HBRV 187.5A*

Digunakan untuk mengetahui nilai kekerasan dari material uji.



**Gambar 3.7** Mesin uji kekerasan

7. *Fujistar Abrasive Paper SiC Grade 60-2000*

Digunakan untuk menghaluskan permukaan material uji sebagai preparasi sebelum pengujian struktur mikro.



**Gambar 3.8** *Abrasive paper*

8. Mesin *Polish*  
Digunakan untuk preparasi spesimen sebelum pengujian struktur mikro.



**Gambar 3.9** *Mesin polish*

9. Larutan Etsa  
Digunakan untuk preparasi pengujian metalografi. Larutan etsa yang digunakan untuk proses etsa *High Chromium White Cast Iron* menurut ASTM E407 *Standard Practice for Microetching Metals and Alloys* untuk melihat *general structure* adalah larutan 10 ml  $\text{HNO}_3$ , 20 ml  $\text{HCl}$ , dan 30 ml air.



10. Mikroskop Optik *Olympus BX51M-RF*  
Digunakan untuk mendapatkan informasi struktur mikro/fasa yang terdapat pada material uji.



**Gambar 3.10** Mikroskop Optik

11. Mesin Pengujian *Pan Analytical XRD*  
Digunakan untuk identifikasi fasa dalam struktur mikro.



**Gambar 3.11** Mesin pengujian XRD



12. Alat Uji Ketahanan Aus  
Digunakan untuk menentukan keausan material akibat gesekan.



**Gambar 3.12** Alat uji ketahanan aus

### 3.5 Tahapan Penelitian

#### 3.5.1 Review Dokumen Perusahaan

Review dokumen perusahaan dilakukan untuk memperoleh informasi dari perusahaan yang berkaitan dengan material *chute inlet feed liner* sebagai pendukung proses penelitian. Berikut adalah informasi yang perlu didapatkan.

1. Desain *vertical roller mill*
2. Desain *chute inlet feed liner*
3. Data operasi
4. Spesifikasi material
5. *Maintenance record*

#### 3.5.2 Preparasi Spesimen

Preparasi spesimen dilakukan dengan melakukan *cutting* pada material *new liner* dan *failure liner*. *Failure liner* dipotong



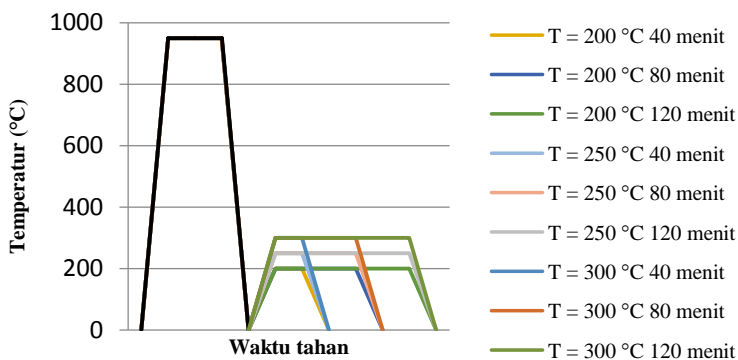
untuk dilakukan pengujian metalografi dan pengujian kekerasan guna mengetahui kondisi material setelah aus.. Sementara material *new liner* dipotong menjadi beberapa bagian untuk diuji sifat kekerasan dan ketahanan ausnya, sebelum diberi perlakuan panas maupun setelah dilakukan proses perlakuan panas.

### 3.5.3 Pengujian Komposisi

Pengujian komposisi kimia adalah untuk mengetahui komposisi kimia yang terdapat pada material *liner* yang baru. Pengujian dilakukan di PT. Logamindo Sarimulia *Iron and Steel Foundry*, Sidoarjo.

### 3.5.4 Proses Perlakuan Panas

Proses perlakuan panas yang dilakukan adalah proses pemanasan dengan temperatur 950°C dan waktu tahan 60 menit kemudian didinginkan dengan media pendingin oli. Setelah itu spesimen akan diberi perlakuan *tempering* dengan tiga variabel waktu tahan yang berbeda yaitu 40, 80, dan 120 menit. Pada masing–masing variabel waktu tahan akan dilakukan *tempering* dengan tiga variabel temperatur yang berbeda yaitu 200°C, 250°C, dan 300°C. Skema perlakuan panas yang diberikan pada spesimen dapat dilihat pada Gambar 3.13.



**Gambar 3.13** Siklus termal perlakuan panas pada penelitian



### 3.5.5 Pengujian Metalografi

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui struktur mikro dari material uji yang mengalami kegagalan. Selain itu juga untuk mengetahui perbedaan struktur mikro material uji sebelum dan setelah dilakukan perlakuan panas. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik di Laboratorium Metalurgi Departemen Teknik Material FTI-ITS.

### 3.5.6 Pengujian Kekerasan

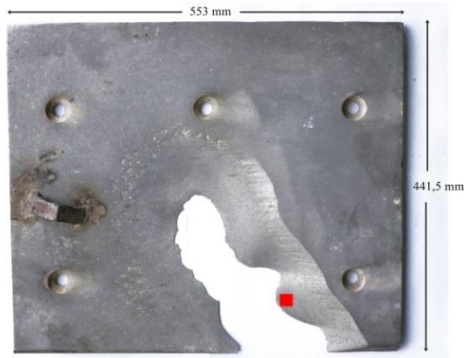
Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui distribusi kekerasan dengan melakukan indentasi di beberapa titik pada material uji. Nilai kekerasan dapat diperoleh dari alat yang digunakan yaitu *Universal Hardness Tester HBRV 187.5A* di Laboratorium Metalurgi, Departemen Teknik Material FTI-ITS atau dapat juga dihitung secara manual menggunakan Rumus 2.1 dengan menggunakan nilai diagonal dari jejak pada spesimen. Spesimen yang akan diuji harus terlebih dahulu diratakan permukaannya agar tidak terjadi cacat indentasi. Parameter yang digunakan pada pengujian kekerasan ditunjukkan pada Tabel 3.1 berikut.

**Tabel 3.1** Parameter Uji Kekerasan

<b>Metode</b>	<i>Vickers</i>
<b>Indentor</b>	<i>Diamond</i> yang berbentuk piramida dengan sudut $136^\circ$
<b>Beban</b>	100 kgf
<b>Waktu pembebanan</b>	10 detik

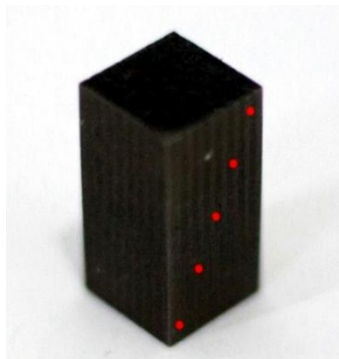
Letak daerah indentasi untuk pengujian kekerasan material yang mengalami kegagalan dapat dilihat pada Gambar 3.14. Material *liner* di bagian seperti pada gambar dipotong sebesar 10 mm x 10 mm . Kemudian dilakukan indentasi sebanyak 5 titik di potongan material *liner* tersebut. Begitu pula untuk material *liner* yang baru dilakukan indentasi sebanyak 5 titik.

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN



**Gambar 3.14** Letak dilakukannya pengujian kekerasan pada material yang gagal

Untuk titik indentasi pada material yang diberi perlakuan panas terdapat pada Gambar 3.15. Pengujian ini menggunakan indentasi sebanyak 5 titik di setiap spesimen secara *cross sectional*.



**Gambar 3.15** Titik indentasi pada setiap spesimen

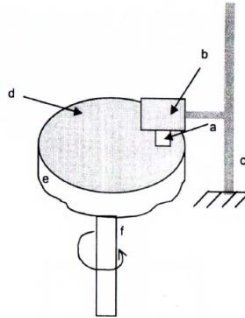
### 3.5.7 Pengujian Ketahanan Aus

Pengujian ini dilakukan untuk memperoleh perbandingan ketahanan aus dari material uji sebelum dan setelah diberi





perlakuan panas. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan metode *pin-on-disc*, mengacu pada prinsip ASTM G99. Skema dari pengujian ini dapat dilihat pada Gambar 3.16.



**Gambar 3.16** Skema uji ketahanan aus material (a) spesimen (b) beban (c) *holder* (d) material abrasif dapat berupa kertas amplas atau batu gerinda (e) piringan pemutar (f) penyangga (Yuswono, 2004)

Dalam melakukan pengujian, ada beberapa prosedur yang harus dilakukan. Di antaranya yaitu pertama, mempersiapkan spesimen dan membersihkannya dari berbagai pengotor yang ada pada permukaan. Setelah itu, melakukan pengukuran dimensi dan menimbang massa (sampai ketelitian 0,001 g). Selanjutnya memasukkan *disk* ke *holding device* dan *pin* ke *holder*. Lalu memberikan pembebanan yang sesuai untuk *pin* terhadap *disk* dan menetapkan rpm yang dibutuhkan (harus konstan). Setelah persiapan selesai, maka pengujian dapat dilakukan. Pengujian dilakukan selama 15 menit 6 detik. Berdasarkan ASTM G99, ada beberapa parameter yang digunakan dalam pengujian ini, yaitu dapat dilihat pada Tabel 3.2 berikut.



**Tabel 3.2** Parameter Uji Ketahanan Aus

<b>Load</b>	2 kg
<b>Speed</b>	869 rpm
<b>Distance</b>	500.000 mm
<b>Temperature</b>	Temperatur kamar
<b>Disk</b>	Kinik Abrasive Material A46QV
<b>Radius</b>	122,5 mm

Hasil yang diperoleh dari pengujian ini berupa *mass loss*, yaitu perubahan massa sebelum dan setelah diekspos pada material abrasif. Namun, agar dapat dibandingkan dengan material yang memiliki perbedaan massa jenis, maka dapat digunakan hasil berupa *volume loss*.

### 3.5.8 Pengujian XRD

Pengujian ini dilakukan untuk mengidentifikasi fasa dalam struktur mikro. Adapun parameter dari pengujian XRD yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3.3 berikut.

**Tabel 3.3** Parameter Uji XRD

<b>Sinar radiasi</b>	Cu-K $\alpha$
<b>2<math>\theta</math> range</b>	10°-90°
<b>Scan speed</b>	2°/menit

Pengujian XRD dilakukan menggunakan alat *Pan Analytical XRD* di Laboratorium Karakterisasi Departemen Teknik Material FTI-ITS. Tahap pertama yang dilakukan dalam analisis sinar-X adalah melakukan analisis pemeriksaan terhadap sampel yang belum diketahui strukturnya. Sampel ditempatkan pada titik fokus hamburan sinar-X yaitu tepat di tengah *plate* yang digunakan sebagai tempat yaitu sebuah plat tipis yang berlubang di tengah berukuran sesuai dengan sampel (pelet) dengan perekat pada sisi baliknya.

Hasil pengujian XRD yang diperoleh dapat digunakan untuk menghitung *microstrain broadening* pada material yang telah diberi perlakuan panas, dengan menggunakan Rumus 3.1 di bawah ini.



$$B = 4\varepsilon \frac{\sin \theta}{\cos \theta} \quad (3.1)$$

$B$  = FWHM (*Full Width Half Maximum*)

$\varepsilon$  = *microstrain broadening*

$\Theta$  = posisi sudut

### 3.6 Rancangan Penelitian

**Tabel 3.4** Rancangan Penelitian

Material	Temperatur Austenitisasi (°C)	Media Pendingin	Temperatur Tempering (°C)	Waktu Tahan Tempering (menit)	Pengujian Komposisi	Pengujian Metalografi	Pengujian Kekerasan	Pengujian Abrasi	Pengujian XRD
<i>New liner</i>	-	-	-	-	√	√	√	√	-
<i>Failure Liner</i>	-	-	-	-	√	√	√	-	√
t200h40	950	Oli	200	40	-	√	√	√	√
t200h80				80	-	√	√	√	√
t200h120				120	-	√	√	√	√
t250h40			250	40	-	√	√	√	√
t250h80				80	-	√	√	√	√
t250h120				120	-	√	√	√	√
t300h40			300	40	-	√	√	√	√
t300h80				80	-	√	√	√	√
t300h120				120	-	√	√	√	√

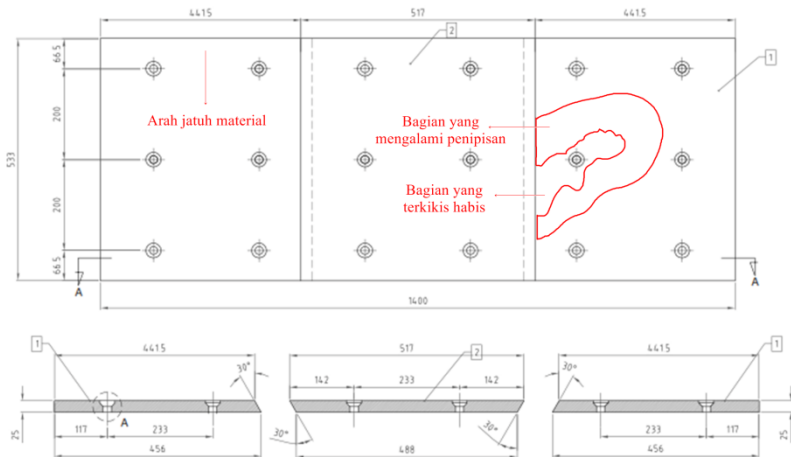
## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Analisis Data Kegagalan pada Material *Liner*

#### 4.1.1 Historis *Chute Inlet Feed Liner* pada *Vertical Roller Mill*

Pada tanggal 30 Desember 2016, dilakukan pelepasan komponen *chute inlet feed liner* pada *vertical roller mill* PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk Pabrik Tuban IV. Setelah diamati, *liner* yang dilepas mengalami keausan terutama di bagian yang tertimpa langsung oleh beban *raw material*. *Liner* tersebut terpasang sejak 1 Maret 2016, yang berarti masih sekitar 9 bulan digunakan. Sementara menurut pihak PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk, komponen *liner* tersebut diharapkan mampu bertahan selama 1 tahun.



**Gambar 4.1** *Chute inlet feed liner assembly*

Ketika terpasang pada dinding *chute inlet*, material disusun menjadi 3 baris dan 3 kolom. Gambar 4.1 menunjukkan satu baris *assembly* dari material *liner*. Material pada penelitian ini terpasang pada baris kedua bagian kanan dari susunan. Untuk data operasi dari material *liner* ditunjukkan pada Tabel 4.1.

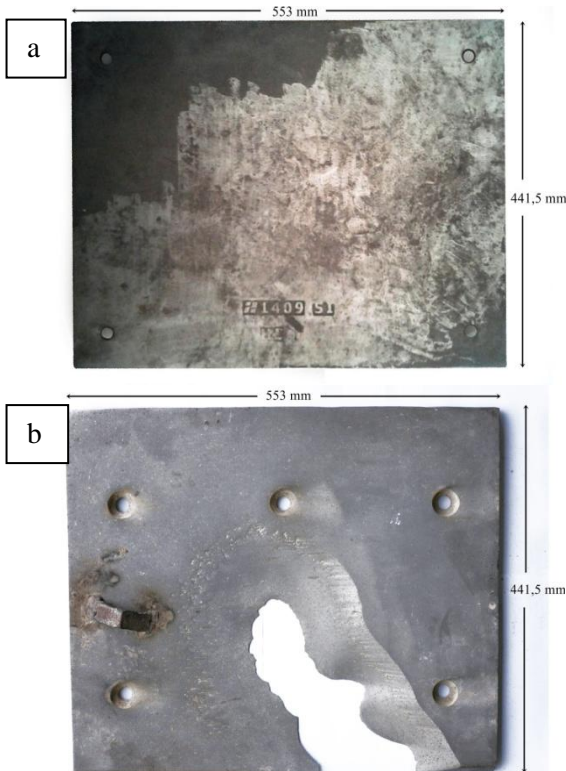


**Tabel 4.1** Data Operasi *Chute Inlet Feed Liner*

Debit raw material	700-800 tph
Temperatur kerja	80-100 °C
Sudut kemiringan	45°
Life time	1 tahun

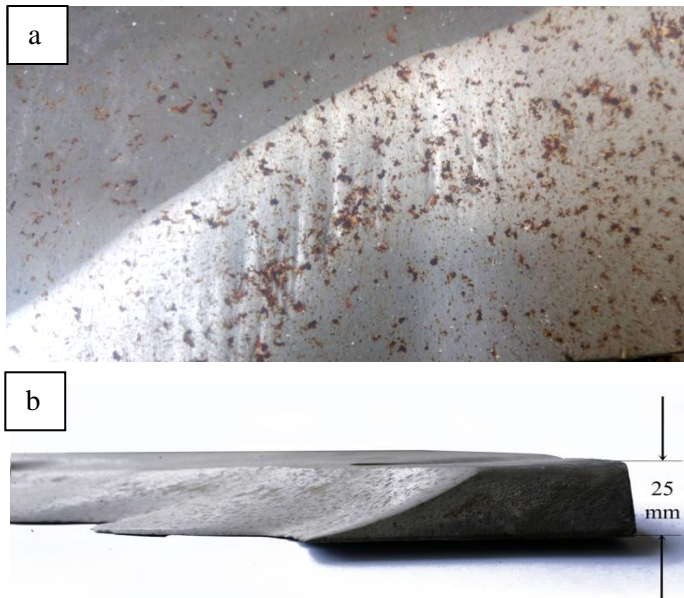
#### 4.1.2 Pengamatan Makroskopik Material *Liner* yang Mengalami Kegagalan

Pengamatan secara makroskopik material *liner* dilakukan menggunakan kamera DSLR.



**Gambar 4.2** Material *liner* (a) New *liner* (b) Failure *liner*

Pada Gambar 4.2 terlihat perbedaan antara material *liner* yang baru dan setelah mengalami keausan. Material *liner* yang baru memiliki dimensi 553 mm x 441,5 mm x 25 mm. Namun pada material *liner* yang telah mengalami keausan, terjadi pengurangan ketebalan hingga terdapat bagian yang terkikis habis. Selain itu, pada permukaan material yang mengalami penipisan terdapat goresan-goresan yang searah dengan arah jatuhnya beban. Untuk penampakan permukaan dari material *liner* dan pengurangan ketebalan material *liner* yang telah mengalami keausan lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 4.3(a) dan (b) .



**Gambar 4.3** (a) Penampang permukaan material *liner* yang mengalami kegagalan (b) Pengurangan ketebalan pada material *liner*



#### 4.1.3 Hasil Uji Komposisi Material *Liner*

Hasil uji komposisi material *liner* yang digunakan oleh PT. Semen Indonesia dan perbandingannya dengan standar yang ada menurut ASTM A532 dan Rohrig (1996) ditunjukkan pada Tabel 4.2 berikut.

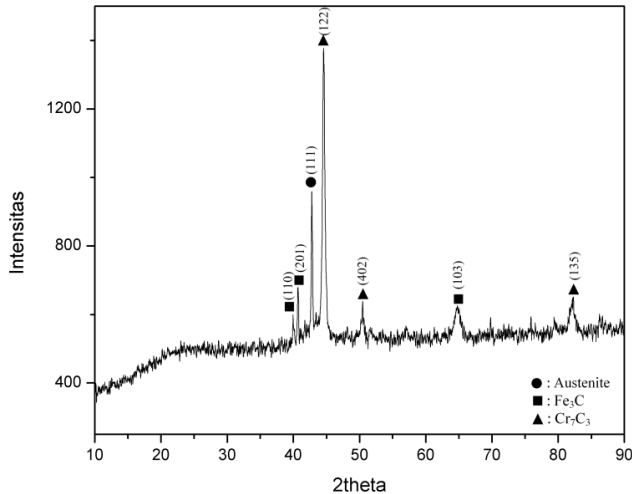
**Tabel 4.2** Perbandingan Komposisi Material *Liner* yang Digunakan dengan Material Standar *Ni-Hard*

<i>Material</i>	<i>Chemical Composition (weight %)</i>							
	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Mo
<b>Material <i>liner</i></b>	2,78	0,802	0,574	0,026	0,037	0,272	24,5	0,637
<b><i>Ni-Hard</i> 1</b>	3,0- 3,6	0,3- 0,5	0,3- 0,7	max 0,15	max 0,3	3,3- 4,8	1,5- 2,6	0-0,4
<b><i>Ni-Hard</i> 2</b>	max 2,9	0,3- 0,5	0,3- 0,7	max 0,15	max 0,3	3,3- 5,0	1,4- 2,4	
<b><i>Ni-Hard</i> 4</b>	2,6- 3,2	1,8- 2,0	0,4- 0,6	max 0,1	max 0,06	4,5- 6,5	8,0- 9,0	0-0,4
<b>ASTM A532 IIIA</b>	2,0- 3,3	max 1,5	max 2,0	max 0,06	max 0,1	max 2,5	23- 30	max 3,0

Dari hasil uji komposisi yang dilakukan, material *liner* yang digunakan oleh PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk tidak termasuk dalam rentang komposisi material *Ni-Hard*. Hasil uji komposisi tersebut menunjukkan bahwa material *liner* yang mengalami kegagalan termasuk dalam ASTM A532 *Class III Type A*, di mana komposisinya terdapat pada Tabel 4.2.



#### 4.1.4 Hasil Uji XRD Material *Liner* yang Mengalami Kegagalan



**Gambar 4.4** Grafik XRD material *liner* yang mengalami kegagalan

Pengujian XRD dilakukan untuk mengetahui senyawa yang terdapat dalam material *liner* yang mengalami kegagalan. Grafik hasil pengujian XRD dapat dilihat pada Gambar 4.4. Terdapat tiga senyawa yang muncul pada grafik tersebut. Senyawa yang pertama yaitu  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  (00-006-0683) muncul pada  $2\theta=44,5629^\circ$  dengan *peak height* 835,68 cts,  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  (00-011-0550) muncul pada  $2\theta=50,5141^\circ$  dengan *peak height* 70,34 cts, dan  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  (01-089-7244) muncul pada  $2\theta=82,1468^\circ$  dengan *peak height* 78,54 cts. Kemudian austenit (00-052-0513) muncul pada  $2\theta=42,7680^\circ$  dengan *peak height* 475,78 cts. Senyawa yang terakhir adalah  $\text{Fe}_3\text{C}$  (01-079-4902) muncul pada  $2\theta=40,7207^\circ$  dan  $2\theta=64,7855^\circ$  dengan *peak height* 156,03 cts dan 82,14 cts, serta  $\text{Fe}_3\text{C}$  (01-077-9136) muncul pada  $2\theta=39,9968^\circ$  dengan *peak height* 74,06 cts. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 4.3.



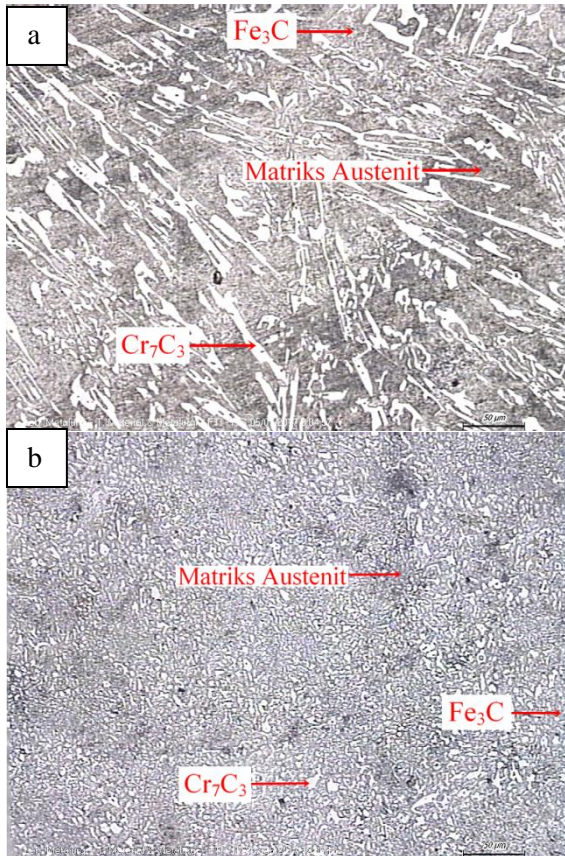


**Tabel 4.3** Daftar *Peak* Hasil Uji XRD *Failure Liner*

Pos. [ $^{\circ}2\theta$ .]	Height [cts]	Fasa	Nomor ICDD
39.9968	74.06	$\text{Fe}_3\text{C}$	01-077-9136
40.7207	156.03	$\text{Fe}_3\text{C}$	01-079-4902
42.768	475.78	Austenit	00-052-0513
44.5629	835.68	$\text{Cr}_7\text{C}_3$	00-006-0683
50.5141	70.34	$\text{Cr}_7\text{C}_3$	00-011-0550
64.7855	82.14	$\text{Fe}_3\text{C}$	01-079-4902
82.1468	78.54	$\text{Cr}_7\text{C}_3$	01-089-7244

#### 4.1.5 Hasil Uji Struktur Mikro Material *Liner* yang Mengalami Kegagalan

Material *liner* yang baru dan yang mengalami kegagalan diamati struktur mikronya menggunakan mikroskop optik. Hasilnya dapat dilihat pada Gambar 4.5, dengan gambar (a) dan (b) masing-masing adalah material *liner* yang baru dan material *liner* yang mengalami kegagalan. Kedua material menunjukkan adanya tiga fasa utama, yaitu austenite,  $\text{Fe}_3\text{C}$ , dan  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ . Pada struktur mikro material yang mengalami kegagalan, bentuk strukturnya mengalami pemipihan jika dibandingkan dengan struktur mikro *new liner*.



**Gambar 4.5** Struktur mikro material liner (a) *New liner* (b) *Failure liner*. Perbesaran 200X.

#### 4.1.6 Hasil Uji Kekerasan Material *Liner* yang Mengalami Kegagalan

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui kekerasan dari material *liner* yang mengalami kegagalan. Rata-rata hasil pengujian kekerasan dapat dilihat pada Tabel 4.4. Material *liner* yang baru memiliki kekerasan sebesar 630 HV.

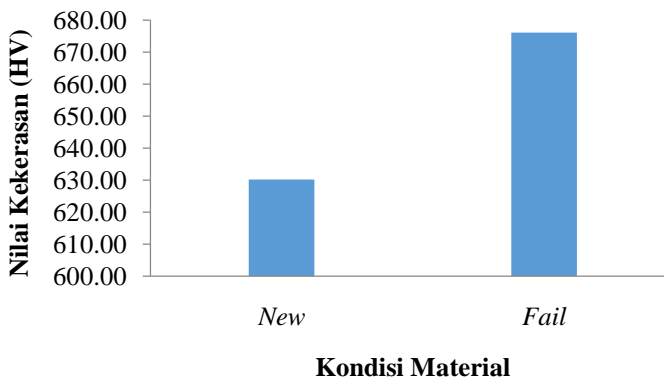


Nilai ini berada di bawah kekerasan material standar. Nilai kekerasan material standar yang seharusnya digunakan berada pada kisaran di atas 630 HV (lihat Tabel 2.2).

**Tabel 4.4** Data Hasil Pengujian Kekerasan *New* dan *Failure Liner*

Nama Spesimen	Rata-rata Kekerasan (HV)
<i>New Liner</i>	630
<i>Failure Liner</i>	676

Pada Tabel 4.3 terlihat bahwa nilai rata-rata kekerasan material yang mengalami kegagalan adalah 676 HV. Jika dibandingkan dengan material *liner* yang baru, pada material *liner* yang mengalami keausan terjadi peningkatan nilai kekerasan. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat grafik peningkatannya pada Gambar 4.6.



**Gambar 4.6** Grafik nilai kekerasan material *new liner* dan *failure liner*

#### 4.2 Analisis Proses Perlakuan Panas Material *Liner*

Setelah dilakukan analisis kegagalan terhadap material *liner*, dilakukan proses perlakuan panas berupa *hardening*. Pemanasan dilakukan hingga temperatur 950°C dengan waktu tahan selama 60 menit lalu didinginkan secara cepat dengan media pendingin oli. Kemudian dilanjutkan dengan proses

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

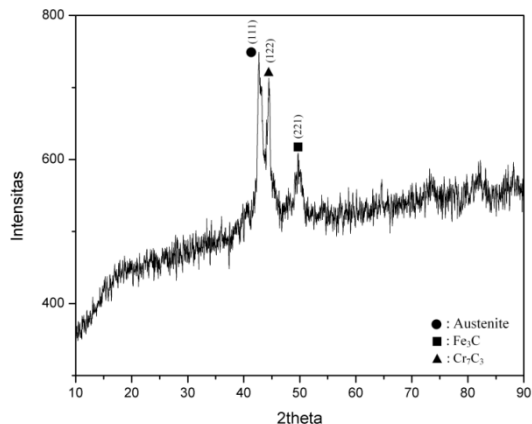


*tempering* dengan tiga variasi temperatur, 200°C, 250°C, dan 300°C, dan waktu tahan, 40 menit, 80 menit, dan 120 menit.

#### 4.2.1 Hasil Uji XRD Material *Liner* setelah Proses Perlakuan Panas

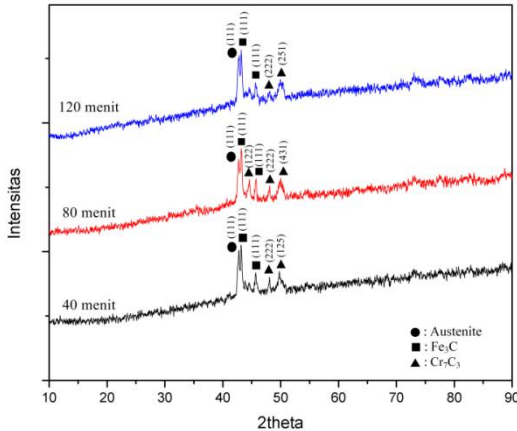
Pengujian XRD dilakukan untuk mengetahui senyawa apa saja yang terdapat dalam material *liner* setelah melalui proses perlakuan panas. Grafik hasil XRD dari material *liner* setelah mengalami perlakuan panas dapat dilihat pada Gambar 4.7-4.10. Secara umum, senyawa yang muncul pada seluruh spesimen adalah sama, yaitu austenit,  $\text{Fe}_3\text{C}$ , dan  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ .

Gambar 4.7 merupakan grafik XRD material *liner* setelah dipanaskan hingga temperatur 950°C, ditahan selama 60 menit, kemudian didinginkan dengan media pendingin oli.



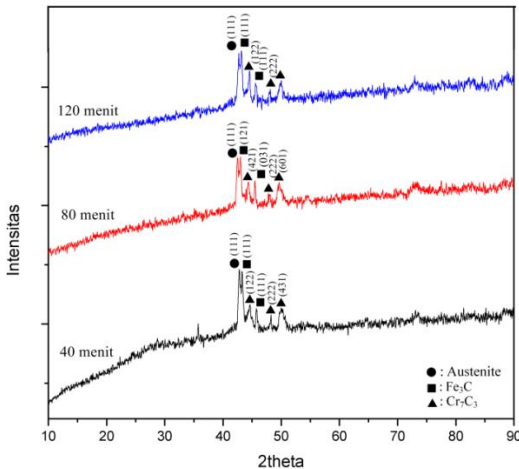
**Gambar 4.7** Grafik XRD material *liner as quenched*

Gambar 4.8 menunjukkan grafik XRD material *liner* setelah *tempering* dengan temperatur 200°C. Pada grafik ini, muncul lebih banyak *peak* dibandingkan dengan grafik pada kondisi *as quenched*. Namun *peak-peak* tersebut masih menunjukkan munculnya fasa yang sama.



**Gambar 4.8** Grafik XRD material *liner* setelah *tempering* 200°C

Untuk grafik XRD material *liner* setelah *tempering* pada temperatur 250°C ditunjukkan pada Gambar 4.9. Muncul *peak*  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  baru pada posisi  $2\Theta=44^\circ$  di ketiga grafik.



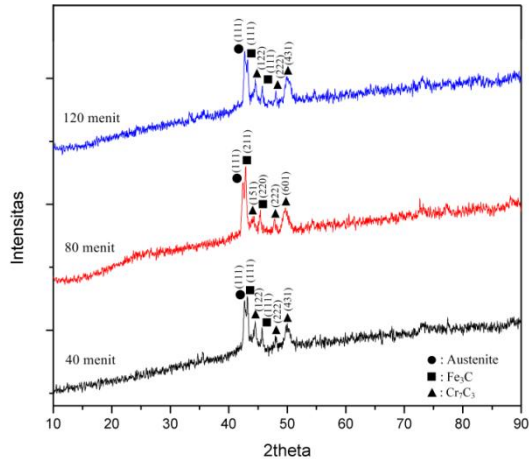
**Gambar 4.9** Grafik XRD material *liner* setelah *tempering* 250°C

Grafik XRD material *liner* setelah *tempering* pada temperatur 300°C ditunjukkan pada Gambar 4.10. *Peak* yang muncul masih sama seperti pada grafik dengan temperatur

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN



*tempring* 250°C. Hanya perbedaannya terdapat pada intensitas masing-masing *peak*.



**Gambar 4.10** Grafik XRD material *liner* setelah *tempring* 300°C

Untuk dapat lebih mudah membandingkan *peak* yang muncul pada seluruh material, dapat dilihat pada Tabel 4.5.

**Tabel 4.5** Perbandingan Daftar *Peak* pada Material *Liner* setelah Proses Perlakuan Panas

Kode Spesimen	Pos. [°2Th.]	Height [cts]	Fasa	Nomor ICDD
<i>Failure liner</i>	39.9968	74.06	Fe <sub>3</sub> C	01-077-9136
	40.7207	156.03	Fe <sub>3</sub> C	01-079-4902
	42.768	475.78	Austenit	00-052-0513
	44.5629	835.68	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	00-006-0683
	50.5141	70.34	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	00-011-0550
	64.7855	82.14	Fe <sub>3</sub> C	01-079-4902
	82.1468	78.54	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	01-089-7244
<i>As quenched</i>	42.725	215.44	Austenit	00-052-0513
	44.5568	165.27	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	00-006-0683



	49.7991	52.05	Fe <sub>3</sub> C	00-077-9135
<b>t200h40</b>	42.7099	199.24	Austenit	00-052-0513
	43.1799	245.37	Fe <sub>3</sub> C	01-089-2005
	45.6828	95.91	Fe <sub>3</sub> C	01-077-9136
	48.051	58.59	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	00-011-0550
	49.7661	74.28	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	01-089-7244
<b>t200h80</b>	42.6782	185.31	Austenit	00-052-0513
	43.3004	228.64	Fe <sub>3</sub> C	00-006-0670
	44.5981	99.24	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	01-089-5902
	45.7733	96.38	Fe <sub>3</sub> C	01-077-9136
	48.0081	44.41	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	00-011-0550
	49.9032	71.17	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	01-071-3789
<b>t200h120</b>	42.712	209.67	Austenit	00-052-0513
	43.2121	247.67	Fe <sub>3</sub> C	01-089-2005
	45.715	81.09	Fe <sub>3</sub> C	01-077-9136
	47.9838	29.05	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	00-011-0550
	49.818	68.79	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	01-089-5902
<b>t250h40</b>	42.7537	242.23	Austenit	00-052-0513
	43.2843	251.47	Fe <sub>3</sub> C	01-089-2005
	44.561	99.98	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	00-006-0683
	45.6853	72.63	Fe <sub>3</sub> C	01-077-9136
	48.128	33.25	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	00-011-0550
	49.9021	77.69	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	01-071-3789
<b>t250h80</b>	42.5247	204.61	Austenit	01-071-4407
	43.0261	201.16	Fe <sub>3</sub> C	00-006-0688
	44.3127	96.84	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	00-011-0550
	45.5142	95.52	Fe <sub>3</sub> C	01-078-5298

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN



---

	49.5709	68.4	$\text{Cr}_7\text{C}_3$	00-011-0550
	47.99	35.21	$\text{Cr}_7\text{C}_3$	00-011-0550
<b>t250h120</b>	42.648	181.33	Austenit	00-052-0513
	43.2561	198.29	$\text{Fe}_3\text{C}$	01-089-2005
	44.5491	126.83	$\text{Cr}_7\text{C}_3$	00-006-0683
	45.6886	71.92	$\text{Fe}_3\text{C}$	01-077-9136
	48.0228	37.95	$\text{Cr}_7\text{C}_3$	00-011-0550
	50.0665	66.1	$\text{Cr}_7\text{C}_3$	00-006-0687
<b>t300h40</b>	42.6967	200.11	Austenit	00-052-0513
	43.188	206.32	$\text{Fe}_3\text{C}$	01-089-2005
	44.5409	112.16	$\text{Cr}_7\text{C}_3$	00-006-0683
	45.7064	78.96	$\text{Fe}_3\text{C}$	01-077-9136
	48.0502	39.81	$\text{Cr}_7\text{C}_3$	01-071-3789
	49.9172	70.85	$\text{Cr}_7\text{C}_3$	01-071-3789
<b>t300h80</b>	42.3863	207.01	Austenit	01-071-4407
	42.8971	277.66	$\text{Fe}_3\text{C}$	01-079-4902
	44.1602	55.27	$\text{Cr}_7\text{C}_3$	00-036-1482
	45.3668	81.81	$\text{Fe}_3\text{C}$	01-078-5298
	47.864	42.57	$\text{Cr}_7\text{C}_3$	00-011-0550
	49.5784	74.58	$\text{Cr}_7\text{C}_3$	00-011-0550
<b>t300h120</b>	42.7121	208.07	Austenit	00-052-0513
	43.2518	175.98	$\text{Fe}_3\text{C}$	01-089-2005
	44.6042	90.32	$\text{Cr}_7\text{C}_3$	00-006-0683
	45.7117	69.82	$\text{Fe}_3\text{C}$	01-077-9136
	48.0665	44.66	$\text{Cr}_7\text{C}_3$	00-011-0550
	49.8496	87.5	$\text{Cr}_7\text{C}_3$	01-071-3789

---





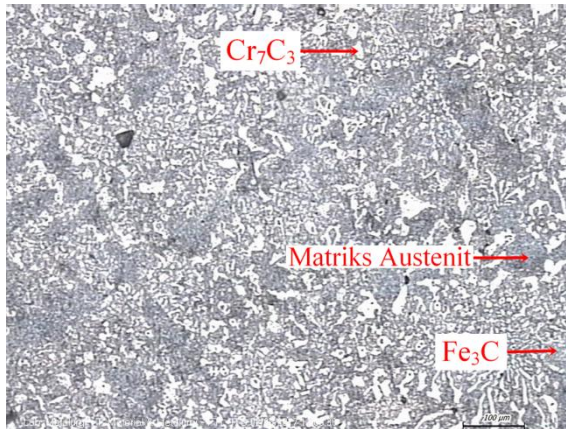
Proses *tempering* akan mengurangi tegangan sisa hasil dari proses *quenching*. Dari hasil pengujian XRD dapat dihitung nilai *microstrain broadening*. Hasilnya dapat dilihat pada Tabel 4.6. Hasil di bawah menunjukkan nilai  $\epsilon$  menurun pada material yang telah mengalami proses *tempering*.

**Tabel 4.6** Perhitungan Nilai *Microstrain Broadening*

Kondisi Material	$2\Theta$	$\Theta$	B (FWHM)	$\epsilon$
<i>As quenched</i>	42.725	21.3625	0.3346	0.213862
	44.5568	22.2784	0.3346	0.204179
	49.7991	24.89955	0.9368	0.504551
<b>t200h40</b>	42.7099	21.35495	0.2342	0.149748
	45.6828	22.8414	0.2007	0.119121
	49.7661	24.88305	0.4015	0.216407
<b>t200h80</b>	42.6782	21.3391	0.2007	0.128433
	44.5981	22.29905	0.2676	0.163127
	49.9032	24.9516	0.9368	0.503353
<b>t200h120</b>	42.712	21.356	0.3346	0.213933
	45.715	22.8575	0.2676	0.158703
	49.818	24.909	0.4015	0.216151

#### 4.2.2 Hasil Uji Struktur Mikro Material *Liner* setelah Proses Perlakuan Panas

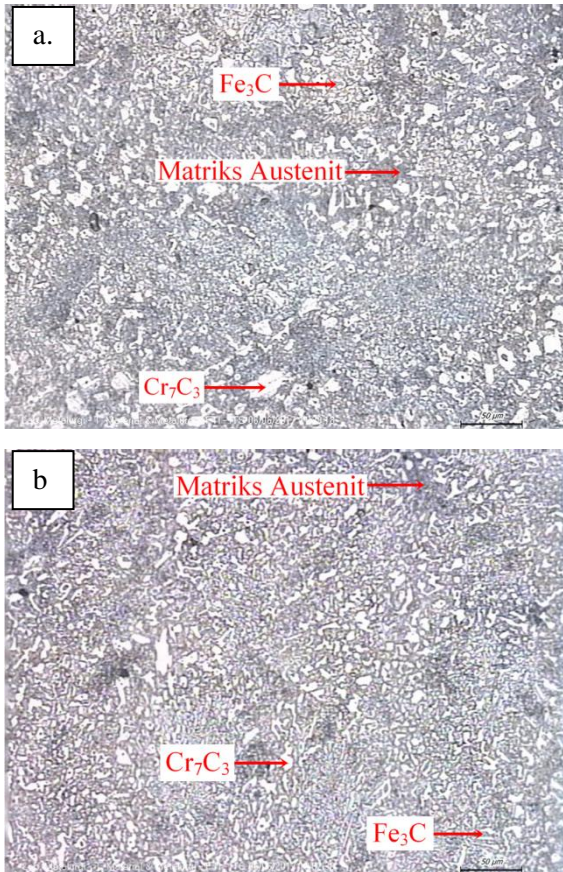
Pengamatan struktur mikro pada material *liner* setelah proses perlakuan panas dilakukan untuk mengetahui perbedaan struktur mikro dari material *liner* sebelum perlakuan panas dan setelah mengalami perlakuan panas yang berbeda-beda.



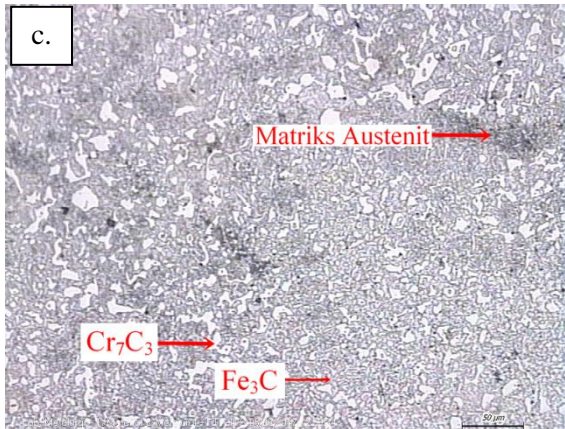
**Gambar 4.11** Struktur mikro material *liner as quenched*.  
Perbesaran 200X.

Gambar 4.11 merupakan hasil struktur mikro dari material *liner* yang dipanaskan hingga temperatur 950°C kemudian didinginkan dengan media pendingin oli. Pada gambar tersebut terlihat bahwa fasa pada struktur mikro material *liner* yang di-*quenching* sama seperti material *liner* yang baru. Perbedaannya terlihat pada jumlah karbida yang lebih banyak pada material *liner as quenched*. Butiran pada struktur mikro terlihat lebih kecil. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa tidak terbentuk struktur martensit pada material *as quenched*.

Gambar 4.12 (a), (b), dan (c) merupakan struktur mikro dari material *liner* setelah *tempering* hingga temperatur 200°C dengan waktu tahan masing-masing 40 menit, 80 menit, dan 120 menit. Tidak terlihat perubahan yang signifikan jika dibandingkan dengan struktur mikro pada material *as quenched*.

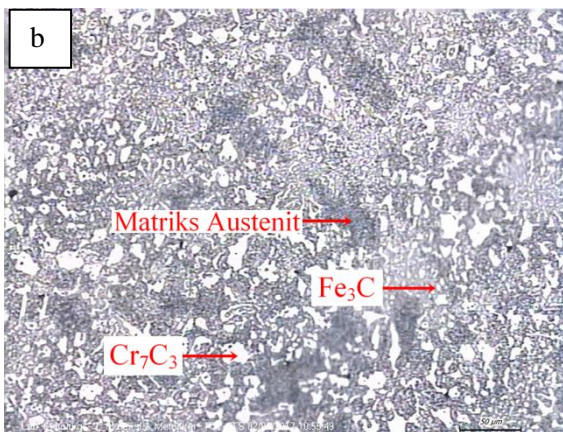
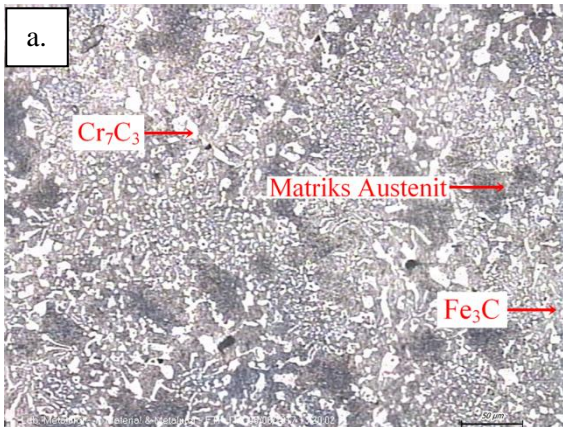


## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

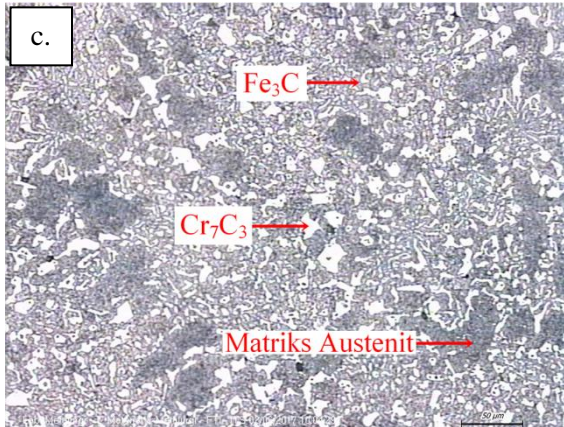


**Gambar 4.12** Struktur mikro material *liner* setelah *tempering* 200°C dengan waktu tahan (a) 40 menit (b) 80 menit (c) 120 menit. Perbesaran 200X.

Untuk Gambar 4.13 (a), (b), dan (c) adalah struktur mikro dari material *liner* setelah *tempering* hingga temperatur 250°C dengan waktu tahan masing-masing 40 menit, 80 menit, dan 120 menit. Pada waktu tahan 40 menit, ukuran butir semakin membesar jika dibandingkan dengan dengan Gambar 4.12. Kemudian dapat dilihat bahwa peningkatan jumlah karbida terjadi pada waktu tahan 80 menit dan 120 menit karena terbentuknya karbida baru di bagian maktriks austenit.

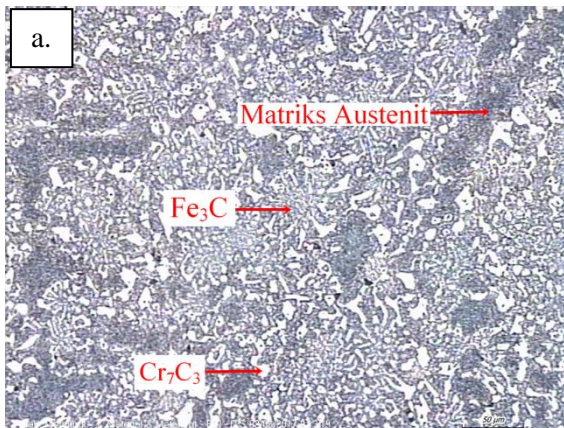


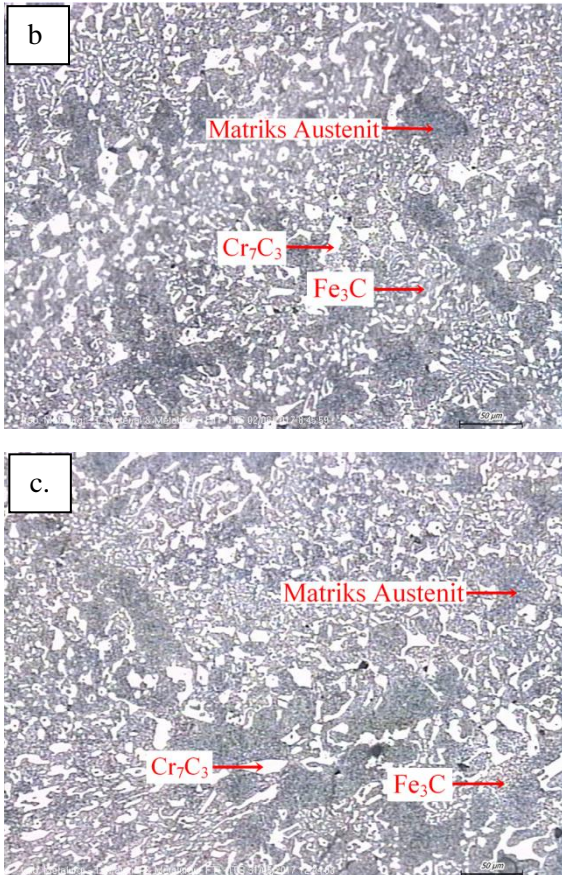




**Gambar 4.13** Struktur mikro material *liner* setelah *tempering* 250°C dengan waktu tahan (a) 40 menit (b) 80 menit (c) 120 menit. Perbesaran 200X.

Yang terakhir Gambar 4.14 (a), (b), dan (c) merupakan struktur mikro dari material *liner* setelah *tempering* hingga temperatur 300°C dengan waktu tahan masing-masing 40 menit, 80 menit, dan 120 menit. Dapat dilihat bahwa matriks austenit pada ketiga gambar membesar dibandingkan dengan Gambar 4.13.





**Gambar 4.14** Struktur mikro material *liner* setelah *tempering* 300°C dengan waktu tahan (a) 40 menit (b) 80 menit (c) 120 menit. Perbesaran 200X.

#### 4.2.3 Hasil Uji Kekerasan Material *Liner* setelah Proses Perlakuan Panas

Pengujian kekerasan dilakukan pada masing-masing permukaan spesimen *as quenched* dan *as tempered*. Hasil dari



pengujian kekerasan masing-masing spesimen dapat dilihat pada Tabel 4.7.

**Tabel 4.7** Rata-rata Nilai Kekerasan Material Setelah Proses Perlakuan Panas

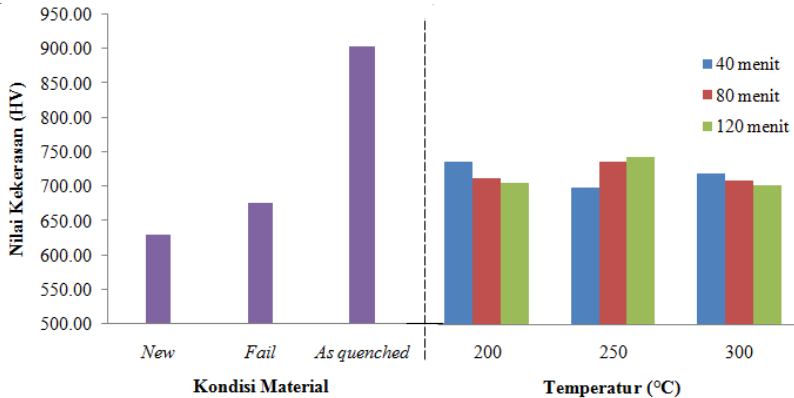
Kode Spesimen	Rata-rata Kekerasan (HV)
<i>New liner</i>	630.22
<i>Failure liner</i>	676.09
<i>As quenched</i>	903.59
t200h40	742.06
t200h80	716.57
t200h120	709.83
t250h40	703.16
t250h80	740.53
t250h120	748.04
t300h40	723.87
t300h80	713.38
t300h120	705.72

Dapat dilihat pada Tabel 4.7 bahwa setelah mengalami perlakuan panas terjadi perubahan nilai kekerasan pada material *liner*. Material *liner* mengalami peningkatan nilai kekerasan yang signifikan pada kondisi *as quenched*. Pada kondisi awal nilai kekerasan hanya 630,22 HV, setelah *quenching* kekerasan material meningkat menjadi 903,59 HV. Setelah *tempering*, kekerasan material kembali menurun. Pada temperatur *tempering* 200°C, kekerasannya menurun berturut-turut pada waktu tahan 40 menit, 80 menit, dan 120 menit, yaitu sebesar 753,58 HV; 716,57 HV; dan 709,83 HV. Kemudian menurun lagi pada temperatur *tempering* 250°C dengan waktu tahan 40 menit menjadi sebesar 703,16 HV. Pada temperatur *tempering* 250°C dengan waktu tahan 80 menit dan 120 menit, nilai kekerasan material meningkat menjadi 740,53 HV dan 748,04 HV. Setelah itu pada pada temperatur *tempering* 300°C nilai kekerasan mengalami penurunan berturut-turut pada waktu tahan 40 menit, 80 menit,





dan 120 menit, yaitu sebesar 723, 87 HV; 713,38 HV; dan 705,72 HV. Namun nilai kekerasan material setelah *tempering* masih berada di atas nilai kekerasan material *liner* yang baru. Untuk lebih jelasnya berikut adalah grafik yang menunjukkan perbedaan nilai kekerasan material *liner* setelah mengalami perlakuan panas pada Gambar 4.15.



**Gambar 4.15** Grafik nilai kekerasan *new liner*, *failure liner*, *as quenched liner*, dan material yang diberi perlakuan panas *tempering* dengan variasi temperatur dan waktu tahan

#### 4.2.4 Hasil Uji Ketahanan Aus Material *Liner* setelah Proses Perlakuan Panas

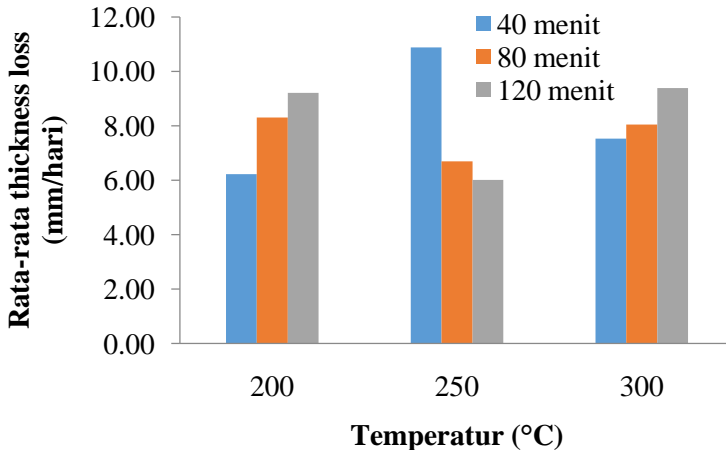
Pada pengujian ketahanan aus data yang diperoleh berupa selisih massa material *liner* sebelum dan setelah pengujian. Hasil tersebut kemudian dikonversikan menjadi *thickness loss* per hari untuk luasan permukaan spesimen dengan ukuran 10x10 mm. Hasilnya dapat dilihat pada Tabel 4.8.



**Tabel 4.8** Perbandingan Laju Keausan dan Kekerasan Material  
*Liner* Setelah Proses Perlakuan Panas

Kode Spesimen	Rata-rata Pengurangan Ketebalan Liner (mm/hari)	Rata-rata Nilai Kekerasan Material (HV)
t200h40	6.22	742.06
t200h80	8.30	716.57
t200h120	9.21	709.83
t250h40	10.88	703.16
t250h80	6.70	740.53
t250h120	6.01	748.04
t300h40	7.53	723.87
t300h80	8.04	713.38
t300h120	9.39	705.72

Pada Tabel 4.8 ditunjukkan bahwa laju keausan pada material dengan temperatur *tempering* 200°C mengalami peningkatan dengan meningkatnya waktu tahan. Nilai laju keausan pada waktu tahan 40 menit, 80 menit, dan 120 menit masing-masing adalah 4,29 mm/hari; 8,30 mm/hari; dan 9,21 mm/hari. Pengurangan massa material juga meningkat pada temperatur *tempering* 250°C dengan waktu tahan 40 menit menjadi sebesar 10,88 mm/hari. Sementara pada temperatur *tempering* 250°C dengan waktu tahan 80 menit dan 120 menit laju keausan mengalami penurunan, masing-masing menjadi sebesar 6,70 mm/hari dan 6,01 mm/hari. Untuk temperatur *tempering* 300°C besar laju keausan kembali meningkat, masing-masing menjadi 7,53 mm/hari; 8,04 mm/hari; dan 9,39 mm/hari pada waktu tahan 40 menit, 80 menit, dan 120 menit. Agar lebih jelas, pada Gambar 4.16 ditampilkan grafik laju keausan material *liner* setelah perlakuan panas.



**Gambar 4.16** Grafik laju keausan material *liner* setelah proses perlakuan panas

#### 4.3 Pembahasan

Setelah dilakukan pengujian komposisi dan kekerasan material, diperoleh bahwa kegagalan yang terjadi pada *chute inlet feed liner* ini karena ketidaksesuaian material yang digunakan dengan material standar. Material standar yang seharusnya digunakan adalah *Ni-Hard*, dengan kekerasan sebesar 630 HV - 860 HV, sementara material yang digunakan oleh PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk adalah ASTM A532 Class III Type A, dengan kekerasan 630 HV. Dengan hasil tersebut terlihat bahwa nilai kekerasan material yang digunakan lebih rendah dari standar yang seharusnya.

Struktur mikro dari material *liner* yang digunakan di PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk juga menunjukkan bahwa material ini termasuk dalam ASTM A532 Class III Type A yang terdiri dari fasa austenit,  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ , dan  $\text{Fe}_3\text{C}$  yang diperkuat dengan hasil XRD yang menunjukkan munculnya *peak* dari ketiga fasa tersebut. Proses solidifikasi pada material ini diawali dengan

---

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN



pembentukan dendrit dari matriks (austenit) pada rentang temperatur solidifikasi tertentu hingga mencapai temperatur eutektik. Kemudian proses berlanjut dengan pembentukan struktur eutektik dengan reaksi  $L \rightarrow \gamma + M_7C_3$  (Nurjaman, 2012). Menurut Cobos, et al (2015) walaupun sementit secara otomatis hilang karena tingginya kadar kromium pada *high chromium white cast iron*, sejumlah sementit masih mungkin untuk terbentuk.

Pada material *liner* yang gagal, terjadi pengurangan ketebalan. Selain itu juga terdapat banyak goresan yang searah dengan arah jatuhnya beban *raw material* pada permukaan material yang mengalami penipisan. Kedua hal tersebut menunjukkan bahwa material *liner* bekerja pada kondisi dengan perilaku *abrasive wear*. Hal ini diperkuat dengan pernyataan Gagg, 2006 bahwa apabila partikel-partikel kecil yang keras dan tajam (seperti debu atau partikel keras dari proses permesinan tertentu) mengabrasi permukaan material yang lain dan saat dilakukan pengamatan pada permukaan material yang terabrasi ditemukan adanya goresan-goresan, maka hal tersebut merupakan indikasi terjadinya *abrasive wear*. Salah satu *raw material* dari produk semen yang melalui *chute inlet feed liner* adalah pasir silika. Walaupun jumlahnya sedikit, namun kekerasan silika dapat mencapai 1430 HV yang berarti jauh di atas kekerasan material *liner*.

Untuk memperbaiki sifat kekerasan dan ketahanan aus dari material *liner* maka diberikan perlakuan panas pada material *liner*. Material *liner* yang mengalami proses pemanasan hingga 950°C kemudian didinginkan dengan media pendinginan oli menghasilkan kekerasan sebesar 903,59 HV. Nilai ini lebih tinggi dari kekerasan material *liner* yang baru, yang hanya mencapai 630 HV. Dari hasil pengamatan struktur mikro dan pengujian XRD, tidak ditemukan fasa martensit setelah proses *quenching*. Semua unsur paduan kecuali kobalt (Co) akan menurunkan



temperatur awal pembentukan martensit (Ms) dan temperatur akhir pembentukan martensit (Mf) (Avner, 1974). Banyaknya unsur paduan pada material *liner* memungkinkan kondisi temperatur awal terbentuknya martensit berada di bawah temperatur kamar. Kadar kromium yang besar menyebabkan kecenderungan material untuk membentuk karbida dibanding memebentuk martensit. Oleh karena itu, kekerasan yang dihasilkan pada material *as quenched* ini dikarenakan banyaknya karbida yang diperlihatkan dari struktur mikro yang diamati. Pada pengamatan struktur mikro yang dilakukan, tidak nampak bentuk jelas dari karbida sekunder. Bentuk karbida sekunder lebih jelas dapat dilihat pada Gambar 2.7. Proses *quenching* menimbulkan adanya tegangan sisa pada material, yang dapat terlihat dari nilai *microstrain broadening* yang tinggi pada Tabel 4.6.

Setelah pendinginan cepat, material *liner* dipanaskan kembali pada temperatur dan waktu tahan yang bervariasi. Dari hasil pengamatan struktur mikro dan pengujian XRD, fasa yang muncul pada seluruh material *liner* setelah mengalami *tempering* sama seperti kondisi awal dan kondisi *as quench*, yaitu terdiri dari fasa austenit,  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ , dan  $\text{Fe}_3\text{C}$ . Untuk temperatur *tempering*  $200^\circ\text{C}$ , nilai kekerasannya adalah 753,58 HV; 716,57 HV; dan 709,83 HV masing-masing untuk waktu tahan 40 menit, 80 menit, dan 120 menit. Nilai kekerasan ini menurun jika dibandingkan dengan kondisi *as quenched*. Suatu material diberi perlakuan *tempering* untuk mengembalikan sifat ketangguhan material setelah diberi perlakuan *quenching* dan juga untuk menghilangkan tegangan sisa yang timbul akibat proses *quenching* (Nurjaman, 2012). Pengurangan tegangan inilah yang menyebabkan turunnya kekerasan dari material *liner* yang ditunjukkan oleh hasil perhitungan *microstrain broadening* pada Tabel 4.6. Hasil tersebut menunjukkan bahwa nilai *microstrain broadening* menurun pada material setelah di-*tempering*.

---

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN



Pada temperatur *tempering* 250°C dengan waktu tahan 40 menit, kekerasan material menurun yaitu menjadi sebesar 703,16 HV yang dikonfirmasi dari ukuran butir pada struktur mikro yang membesar. Namun kekerasan material meningkat pada temperatur *tempering* 250°C dengan waktu tahan 80 menit dan 120 menit, masing-masing 740,53 HV dan 748,04 HV. Fenomena ini terjadi karena terbentuknya karbida sekunder pada temperatur *tempering* tersebut. Unsur pembentuk karbida dalam jumlah banyak akan memberikan *secondary hardness* pada baja saat ditemper, yaitu kenaikan kekerasan pada temperatur *tempering* tertentu. (Avner, 1974). Hal ini terbukti dengan lebih banyaknya kandungan karbida yang terlihat muncul di bagian matriks austenite pada hasil struktur mikro material pada temperatur *tempering* 250°C dengan waktu tahan 80 menit dan 120 menit.

Kemudian pada temperatur *tempering* 300°C nilai kekerasan mengalami penurunan kembali pada waktu tahan 40 menit, 80 menit, dan 120 menit, yaitu menjadi sebesar 723,87 HV; 713,38 HV; dan 705,72 HV. Jumlah karbida pada temperatur ini menurun, disebabkan terdegradasinya karbida tersebut menjadi struktur austenit akibat temperatur *tempering* yang terlalu tinggi (Astuti, 2015).

Sifat ketahanan aus material *liner* pada penelitian ini direpresentasikan dengan besar laju keausan dalam satuan mm/hari. Kekerasan dianggap sebagai indikasi dari sifat ketahanan aus (Rohrig, 1996). Nilai kekerasan dan laju keausan dari material *liner* memiliki hubungan berbanding terbalik. Sehingga semakin keras suatu material maka akan semakin kecil nilai laju keausannya, yang berarti semakin baik sifat ketahanan aus yang dimiliki.

Material *liner* yang memiliki kekerasan yang paling tinggi adalah material *as quenched*, namun apabila material tersebut digunakan, maka akan dapat membahayakan. Tegangan sisa dari material *as quenched* ini akan terus terakumulasi



terutama saat pemakaian dalam aplikasi pembebanan, sehingga akan menimbulkan retak hingga terjadinya perpatahan (Nurjaman, 2012). Oleh karena itu, perlakuan panas yang sesuai untuk dilakukan pada material *liner* adalah perlakuan *quenching* kemudian ditemper pada temperatur 250°C dengan waktu tahan 120 menit karena menghasilkan kekerasan yang paling tinggi dan nilai laju keausan yang paling rendah. Proses perlakuan panas yang dilakukan telah meningkatkan nilai kekerasan material dari kondisi *new*.

Secara umum, proses *tempering* akan mengurangi tegangan sisa dari material setelah mengalami *quenching*, sehingga nilai kekerasan material akan mengalami penurunan. Namun kenaikan kekerasan akan terjadi pada temperatur *tempering* tertentu karena terbentuknya karbida sekunder. Pemanasan kembali pada temperatur yang terlalu tinggi menyebabkan karbida akan terdegradasi menjadi austenit.

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan beberapa pengujian yang telah dilakukan, dapat diambil beberapa kesimpulan, yaitu:

1. Faktor penyebab terjadinya kegagalan pada komponen *chute inlet feed liner* pada *vertical roller mill* adalah ketidaksesuaian material yang digunakan dengan material standar yang mengakibatkan terjadinya *abrasive wear* yang berlebihan, sehingga material tidak mencapai *lifetime* yang diinginkan.
2. Jenis perlakuan panas yang menghasilkan kekerasan dan sifat ketahanan aus paling tinggi adalah material yang di-*hardening* kemudian di-*tempering* pada temperatur 250°C dengan waktu tahan 120 menit, sehingga perlakuan panas ini dapat dijadikan salah satu solusi dari kegagalan yang terjadi pada material *liner*.

#### **5.2 Saran**

1. Melakukan penelitian dengan rentang temperatur yang lebih besar, agar perbedaan hasil yang diperoleh lebih signifikan.
2. Menggunakan material yang sesuai dengan standar atau material lain yang memiliki kekerasan dan sifat ketahanan aus yang lebih baik, serta lebih efisien dalam penggunaannya.





*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR PUSTAKA

- , 1991. *ASM Handbook Vol. 1 Properties and Selection Iron Steels and High Performance Alloy*. USA: ASM International.
- , 1991. *ASM Handbook Vol. 4 Heat Treating*. USA: ASM International.
- , 1991. *ASM Handbook Vol. 11 Failure Analysis*. USA: ASM International.
- , 2003. *ASTM A532 Standard Specification for Abrasion-Resistant Cast Irons*. USA: ASM International.
- , 2003. *ASTM G99 Standard Test Method for Wear testing with Pin-on-Disk Apparatus*. USA: ASM International.
- Askeland, Donald R. 2010. *The Science and Engineering of Materials*. USA: Congage Learning
- Astuti, Widi. 2015. *Karakteristik Struktur Mikro dan Sifat Mekanik Besi Tuang Putih Paduan Krom Tinggi Hasil Thermal Hardening untuk Aplikasi Grinding Ball*. *Majalah Metalurgi* V: 177-184
- Avner, Sidney H. 1974. *Introduction To Physical Metallurgy*. Singapore: McGraw-Hill Book Co.
- Bahfie, Fathan. 2015. *Effect of Hardening on Hardness and Microstructure of High Chromium White Cast Iron*. Surabaya: ICOMMET 2015
- Callister, William. 2007. *Material Science and Engineering An Introduction*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Cobos, et al. 2015. *Improvement of Abrasive Wear Resistance of The High Chromium Cast Iron ASTM A-532 through Thermal Treatment Cycles*. *Facultad de Ingenieria* Vol.25: 93-103
- Dieter, George E. 1987. *Metalurgi Mekanik*. Jakarta: Erlangga.
- FLSmidth. 2016. *about us* : FLSmidth. Februari 10. [http://www.flsmidth.com/~media/Brochures/Brochures%20for%20raw%20grinding%20and%20silos/ATOX\\_Raw\\_Mill.ashx](http://www.flsmidth.com/~media/Brochures/Brochures%20for%20raw%20grinding%20and%20silos/ATOX_Raw_Mill.ashx).

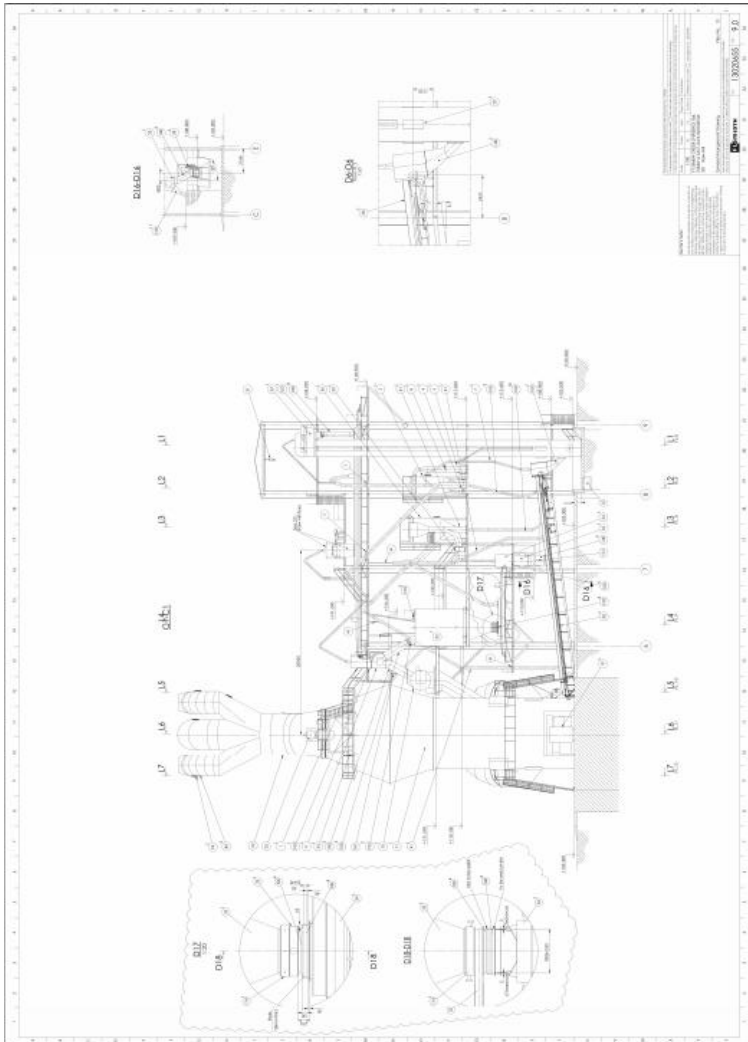
- Gagg, Colin R, Peter R. Lewis. 2007. *Wear as a Product Failure Mechanism – Overview and Case Studies*. Engineering Failure Analysis 14: 1618-1640.
- Hanidya, Inggil. 2016. *Seksi Pemeliharaan Mesin Packer dan Pelabuhan Pabrik Tuban*. Surabaya: Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
- Hinckley, et al. 2008. *SEM Investigation of Heat Treated High Chromium Cast Irons*. Materials Forum Vol. 32.
- Kopycinski, et, al. 2014. *Analysis of The High Chromium Cast Iron Microstructure after The Heat Treatment*. AGH University of Science and Technology.
- Li D., Liu L., Zhang Y., Ye C., Ren X., Yang Y., Yang Q., 2009. *Phase Diagram Calculation of High Chromium Cast Irons and Influence of Its Chemical Composition*. Materials & Design 30: 340–345
- Murtiono, Arief. 2012. *Pengaruh Quenching dan Tempering terhadap Kekerasan dan Kekuatan Tarik serta Struktur Mikro Baja Karbon Sedang Untuk Mata Pisau Pemanen Sawit*. Sumatera: Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sumatera Utara.
- Nurjaman, Fajar. 2012. *Pembuatan Grinding Ball dari Material White Cast Iron dengan Penambahan Chromium, Molybdenum, Vanadium, dan Boron sebagai Unsur Pduan Pembentuk Karbida*. Depok: Departemen Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia.
- Ortega-Cubillos, Patricia. 2015. *Wear Resistance of High Chromium White Cast Iron for Coal Grinding Rolls*. Brasil: Universidad de Antioquia.
- Rina Dwi Yani, Tri Pratomo, Hendro Cahyono. 2008. *Pengaruh Perlakuan Panas Terhadap Struktur Mikro Logam ST 60*. Pontianak: Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Pontianak.
- Rohrig, K. 1996. *Ni-Hard Material Data and Applications*. Canada: Nickel Development Institute.

- Wiengmoon, A. 2011. *Carbides in High Chromium Cast Irons*.  
Naresuan University.
- Yuswono. 2004. *Pembuatan Perunggu (Paduan Cu-10%Sn)  
Berpori untuk Komponen Bantalan Pelumas Sendiri*.  
Serpong: Prosiding Pertemuan Ilmu Pengetahuan dan  
Teknologi Bahan.

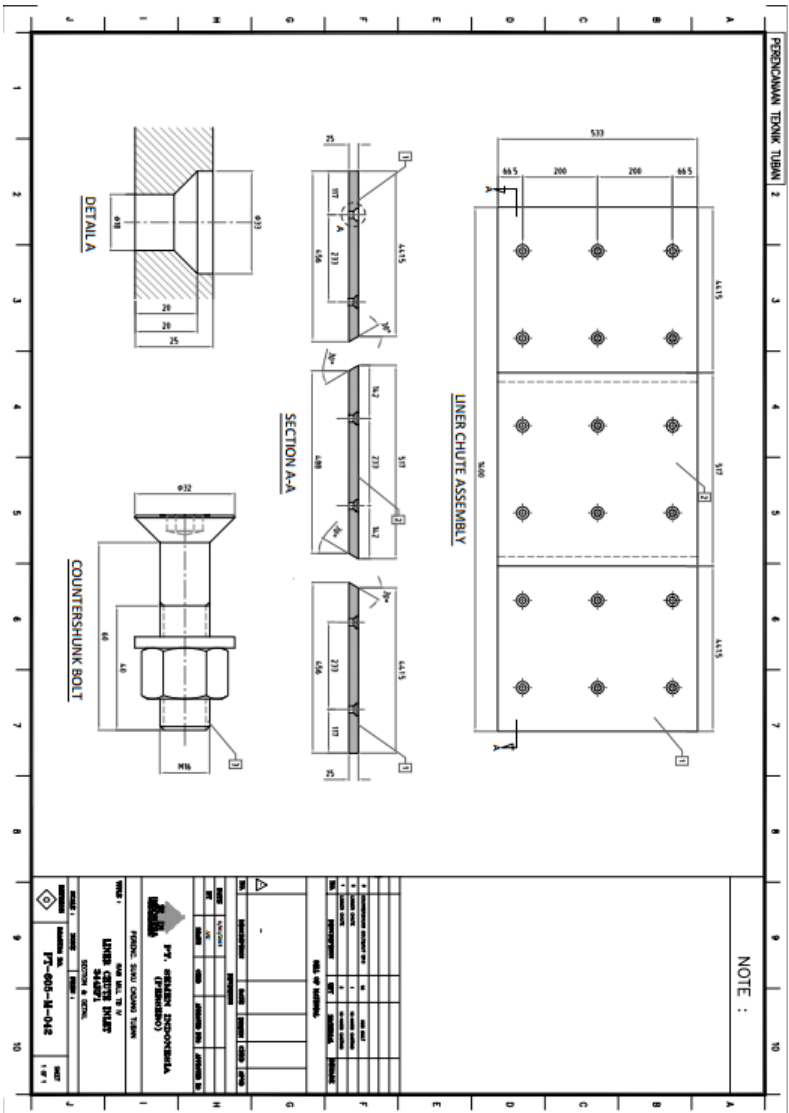
*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## LAMPIRAN

a. Gambar Desain *Vertical Roller Mill*



b. Gambar Desain *Chute Inlet Feed Liner*



c. Hasil Uji Komposisi Kimia



**PT. LOGAMINDO SARIMULIA**  
 IRON AND STEEL FOUNDRY  
 Telp : (62-31) 8544540 - 41 Fax : (62-31) 8544542  
 E mail : lisafoundry@gmail.com  
 www.logamindosarimulia.com



Method: Fe-01-F  
 Comment: Orientation  
 Sample Name: Quality:  
 Element concentration

4/4/2017 10:44:32 AM

Fe+Cr

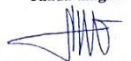
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	2.77	0.805	0.573	0.0373	0.0278	24.47	0.637	0.273
2	2.79	0.800	0.575	0.0379	0.0253	24.48	0.639	0.271
3	2.78	0.800	0.576	0.0371	0.0242	24.56	0.635	0.274
< x > (3)	2.78	0.802	0.574	0.0374	0.0257	24.50	0.637	0.272
sd	0.0087	0.0031	0.0015	0.00039	0.0018	0.0475	0.0021	0.0013
rsd	0.3	0.4	0.3	1.0	7.2	0.2	0.3	0.5

	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.0512	0.0318	0.0479	0.0520	0.0168	0.0764	< 0.0100	< 0.0040
2	0.0529	0.0317	0.0479	0.0521	0.0165	0.0764	< 0.0100	< 0.0040
3	0.0529	0.0318	0.0481	0.0519	0.0169	0.0759	< 0.0100	< 0.0040
< x > (3)	0.0523	0.0317	0.0479	0.0520	0.0167	0.0763	< 0.0100	< 0.0040
sd	0.00099	0.00007	0.00011	0.00011	0.00023	0.00027	0.00000	0.00000
rsd	1.9	0.2	0.2	0.2	1.4	0.4	0.0	0.0

	Sn	Mg	As	Zr	Bi	Ca	Ce	Sb
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.0075	0.0179	0.0079	< 0.0015	< 0.0050	0.0011	0.0223	< 0.0020
2	0.0077	0.0179	0.0084	< 0.0015	< 0.0050	0.0012	0.0228	< 0.0020
3	0.0079	0.0179	0.0094	< 0.0015	< 0.0050	0.0011	0.0224	< 0.0020
< x > (3)	0.0077	0.0179	0.0086	< 0.0015	< 0.0050	0.0011	0.0225	< 0.0020
sd	0.00021	0.00003	0.00077	0.00000	0.00000	0.00006	0.00027	0.00000
rsd	2.8	0.2	9.0	0.0	0.0	5.3	1.2	0.0

	Te	B	Zn	La	Fe			
	%	%	%	%	%			
1	0.0037	0.0013	> 0.0540	0.0090	70.0			
2	0.0030	0.0012	> 0.0540	0.0090	70.0			
3	0.0036	0.0012	> 0.0540	0.0086	69.9			
< x > (3)	0.0035	0.0012	> 0.0540	0.0089	69.9			
sd	0.00043	0.00003	0.00000	0.00020	0.0510			
rsd	12.4	2.1	0.0	2.3	0.1			

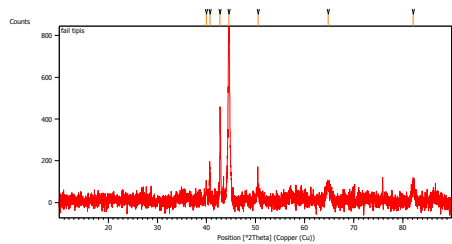
Tanda tangan





d. Hasil Uji XRD

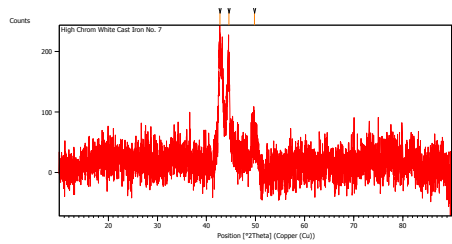
1. *Failure Liner*



Peak list:

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
39.9968	74.06	0.2676	2.25424	8.86
40.7207	156.03	0.2007	2.21583	18.67
42.7680	475.78	0.0669	2.11437	56.93
44.5629	835.68	0.2676	2.03329	100.00
50.5141	70.34	0.2676	1.80683	8.42
64.7855	82.14	0.8029	1.43907	9.83
82.1468	78.54	0.8029	1.17338	9.40

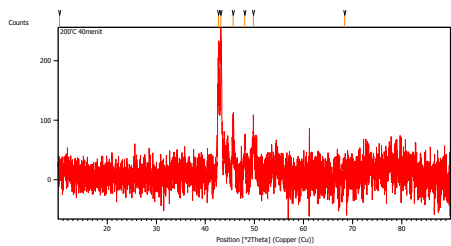
2. *As Quenched*



Peak list:

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
42.7250	215.44	0.3346	2.11641	100.00
44.5568	165.27	0.3346	2.03356	76.71
49.7991	52.05	0.9368	1.83108	24.16

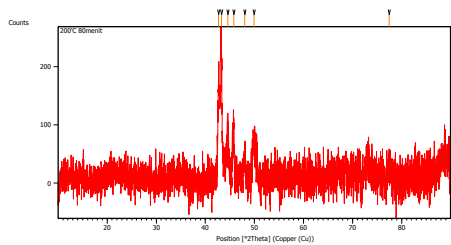
3.       Spesimen t200h40



Peak list:

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
10.2992	0.86	0.6691	8.58920	0.35
42.7099	199.24	0.2342	2.11712	81.20
43.1799	245.37	0.2007	2.09516	100.00
45.6828	95.91	0.2007	1.98602	39.09
48.0510	58.59	0.2007	1.89353	23.88
49.7661	74.28	0.4015	1.83222	30.27

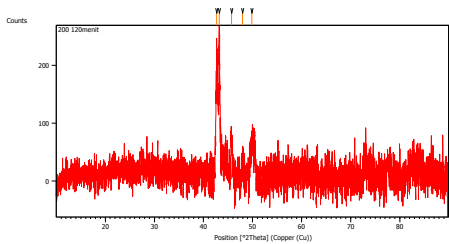
4.       Spesimen t200h80



Peak list:

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
42.6782	185.31	0.2007	2.11862	81.05
43.3004	228.64	0.1673	2.08961	100.00
44.5981	99.24	0.2676	2.03177	43.41
45.7733	96.38	0.2007	1.98231	42.15
48.0081	44.41	0.4015	1.89512	19.42
49.9032	71.17	0.9368	1.82750	31.13

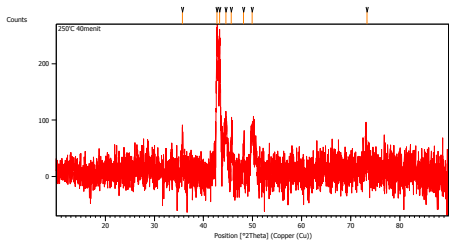
5.       Spesimen t200h120



Peak list:

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
42.7120	209.67	0.3346	2.11702	84.66
43.2121	247.67	0.1338	2.09367	100.00
45.7150	81.09	0.2676	1.98470	32.74
47.9838	29.05	0.4015	1.89602	11.73
49.8180	68.79	0.4015	1.83043	27.77

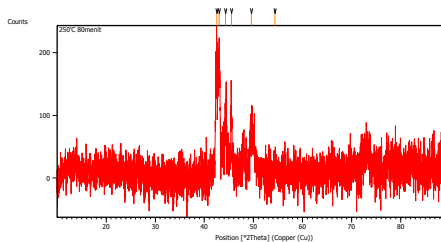
6.       Spesimen t250h40



Peak list

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
35.7388	67.23	0.2007	2.51244	26.74
42.7537	242.23	0.2676	2.11505	96.33
43.2843	251.47	0.1338	2.09034	100.00
44.5610	99.98	0.5353	2.03338	39.76
45.6853	72.63	0.2342	1.98592	28.88
48.1280	33.25	0.4015	1.89068	13.22
49.9021	77.69	0.6691	1.82754	30.89
73.3048	27.43	0.8029	1.29144	10.91

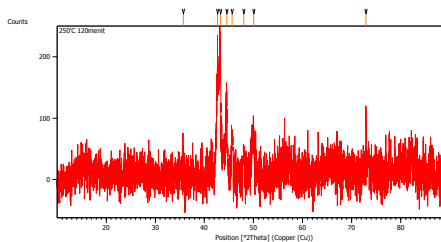
7.       Spesimen t250h80



Peak list:

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
42.5247	204.61	0.2007	2.12591	100.00
43.0261	201.16	0.2007	2.10229	98.31
44.3127	96.84	0.2676	2.04419	47.33
45.5142	95.52	0.2676	1.99299	46.68
49.5709	68.40	0.6691	1.83897	33.43
54.4100	15.82	0.8029	1.68630	7.73

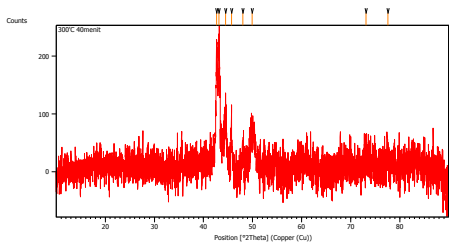
## 8. Specimen t250h120



Peak list:

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
35.7021	13.28	0.8029	2.51494	6.70
42.6480	181.33	0.2676	2.12005	91.45
43.2561	198.29	0.2007	2.09164	100.00
44.5491	126.83	0.1673	2.03389	63.96
45.6886	71.92	0.2676	1.98578	36.27
48.0228	37.95	0.4015	1.89457	19.14
50.0665	66.10	0.4684	1.82193	33.33
72.9217	30.54	0.8029	1.29728	15.40

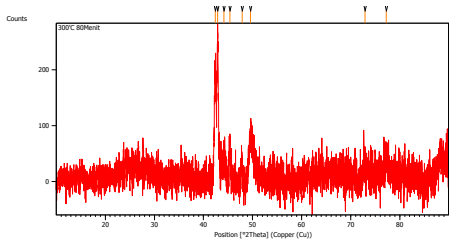
9.       Spesimen t300h40



Peak list:

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
42.6967	200.11	0.2342	2.11774	96.99
43.1880	206.32	0.1338	2.09478	100.00
44.5409	112.16	0.2007	2.03425	54.36
45.7064	78.96	0.2007	1.98505	38.27
48.0502	39.81	0.4015	1.89356	19.29
49.9172	70.85	0.6691	1.82703	34.34
73.1216	27.42	0.8029	1.29422	13.29
77.5586	24.02	0.4015	1.23090	11.64

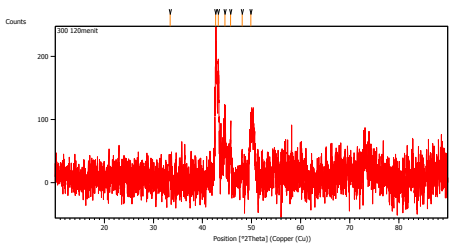
10.       Spesimen t300h80



Peak list:

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
42.3863	207.01	0.2676	2.13253	74.56
42.8971	277.66	0.1673	2.10831	100.00
44.1602	55.27	0.5353	2.05090	19.91
45.3668	81.81	0.2007	1.99912	29.46
47.8640	42.57	0.5353	1.90049	15.33
49.5784	74.58	0.8029	1.83871	26.86
72.9120	27.85	0.8029	1.29743	10.03
77.2278	25.45	0.8029	1.23534	9.16

11.        Specimen t300h120



Peak list:

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
33.4006	26.00	0.4015	2.68278	12.49
42.7121	208.07	0.1673	2.11701	100.00
43.2518	175.98	0.1673	2.09184	84.58
44.6042	90.32	0.2676	2.03151	43.41
45.7117	69.82	0.2007	1.98483	33.55
48.0665	44.66	0.2007	1.89295	21.47
49.8496	87.50	0.6691	1.82934	42.05

e. ICDD Card

Name and formula

Reference code: 00-052-0513  
Compound name: Iron  
Common name:  $\gamma$ -Fe, austenite  
Empirical formula: Fe  
Chemical formula: Fe

Crystallographic parameters

Crystal system: Cubic  
Space group: Fm-3m  
Space group number: 225  
a (Å): 3.6599  
b (Å): 3.6599  
c (Å): 3.6599  
Alpha (°): 90.0000  
Beta (°): 90.0000  
Gamma (°): 90.0000  
Calculated density (g/cm<sup>3</sup>): 7.57  
Volume of cell (10<sup>-6</sup> pm<sup>3</sup>): 49.02  
Z: 4.00  
RIR: 7.98

Status, subfiles and quality

Status: Diffraction data collected at non ambient temperature  
Subfiles: Alloy, metal or intermetallic  
Quality: Inorganic  
Calculated (C)

Comments

Creation Date: 8/9/2001  
Modification Date: 1/12/2011

General Comments: High-temperature phase stable between 1183 K and 1653 K  
Temperature of Data Collection: Pattern taken at 1349 K  
Unit Cell: Reference reports: a=3.6508 at 1223 K, a=3.6535 at 1276 K, a=3.666 at 1440 K and a=3.6810 at 1634 K. Unit Cell Data Source: Single Crystal.

References

Primary reference: Kohlihaas, R., Dunner, P., Schmitz-Pranghe, N., *Z. Angew. Phys.*, **23**, 245, (1967)

Peak list

No.	h	k	l	d (Å)	2Theta(deg)	I (%)
1	1	1	1	2.11300	42.760	100.0
2	2	0	0	1.81000	49.787	42.8
3	2	2	0	1.29400	73.066	17.9
4	3	1	1	1.10350	88.542	16.8
5	2	2	2	1.05650	93.623	4.6
6	4	0	0	0.91500	114.674	2.0
7	3	3	1	0.83960	133.115	6.6
8	4	2	0	0.81840	140.517	6.3

### Name and formula

Reference code: 01-071-4407  
Compound name: Iron  
Common name: γ-Fe  
Empirical formula: Fe  
Chemical formula: Fe

### Crystallographic parameters

Crystal system: Cubic  
Space group: Fm-3m  
Space group number: 225  
a (Å): 3.6544  
b (Å): 3.6544  
c (Å): 3.6544  
Alpha (°): 90.0000  
Beta (°): 90.0000  
Gamma (°): 90.0000  
Volume of cell (10<sup>-6</sup> nm<sup>3</sup>): 48.80  
Z: 4.00  
RIR: 7.97

### Status, subfiles and quality

Status: Diffraction data collected at non ambient temperature  
Alternate Pattern  
Subfiles: Alloy, metal or intermetallic  
ICSD Pattern  
Inorganic  
Quality: Indexed (I)

### Comments

ANX: N  
Creation Date: 11/20/2008  
Modification Date: 1/19/2011  
ANX: N  
Analysis: Fe1  
Formula from original source: Fe  
ICSD Collection Code: 53449

Calculated Pattern Original Remarks: Cell from 2nd reference at 1223 K: 3.6535, at 1349 K: 3.6599, at 1440 K: 3.6660, at 1634 K: 3.6810. Stable form from 1183 to 1663 K, cell at 1173 K: 3.6465, at 1373 K: 3.6623. Cell from 3rd reference at 1193 K: 3.6477, at 1323 K: 3.6570, at 1343 K: 3.6580, M.p. 1608 K.  
Temperature of Data Collection: 1223 K. Minor Warning: No e.s.d reported/abstracted on the cell dimension. No R factors reported/abstracted.  
Wyckoff Sequence: a(FM3-M). Unit Cell Data Source: Single Crystal.

### References

Primary reference: Calculated from ICSD using POWD-12++  
Structure: Straumanis, M.E., Kim, D.C., *Z. Metall.*, **60**, 272, (1969)

### Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta(deg)	I (%)
1	1	1	1	2.10990	42.826	100.0
2	2	0	0	1.62720	49.668	43.4
3	2	2	0	1.29200	73.198	18.3
4	3	1	1	1.10180	88.714	17.4
5	2	2	2	1.05490	93.808	4.7
6	4	0	0	0.91360	114.948	2.1
7	3	3	1	0.83840	133.495	6.6
8	4	2	0	0.81710	141.028	6.6



## Name and formula

Reference code: 00-036-1462  
Compound name: Chromium Carbide  
Common name: heptachromium tricarbide  
Empirical formula:  $C_7Cr_7$   
Chemical formula:  $Cr_7C_3$

## Crystallographic parameters

Crystal system: Orthorhombic  
Space group: Pmcn  
Space group number: 51  
a (Å): 7.0149  
b (Å): 12.1530  
c (Å): 4.5320  
Alpha (°): 90.0000  
Beta (°): 90.0000  
Gamma (°): 90.0000  
Volume of cell ( $10^{-6} \text{ pm}^3$ ): 386.36  
Z: 4.00  
RIR: -

## Subfiles and quality

Subfiles: Alloy, metal or intermetallic  
Common Phase  
Educational pattern  
Inorganic  
NIST pattern  
Quality: Star (5)

## Comments

Color: Greenish gray  
Creation Date: 1/1/1970  
Modification Date: 1/11/2011  
Additional Patterns: See 00-011-0550  
Color: Greenish gray  
General Comments: The structure was determined by Rousault, M., Harpin, P., Fruchart, M., Ann. Chim. (Paris), 5 461 (1970)  
Sample Source or Locality: The sample was obtained from CERAC, Incorporated, Milwaukee, Wisconsin, USA  
Temperature of Data Collection: The mean temperature of data collection was 297.6 K  
Unit Cell Data Source: Powder Diffraction.

## References

Primary reference: McMurdie, H., Morris, M., Evans, E., Paretskin, B., Wong-Ng, W., Hubbard, C., *Powder Diff.*, 1, 89, (1986)

## Peak list

No.	h	k	l	d (Å)	2Theta(deg)	I (%)
1	0	4	0	3.03900	29.366	2.0
2	1	5	0	2.29690	39.189	33.0
3	0	0	2	2.26580	39.750	3.0
4	0	5	1	2.14120	42.170	6.0
5	1	1	2	2.12310	42.547	46.0
6	1	5	1	2.04890	44.167	100.0
7	0	6	0	2.02560	44.702	13.0
8	3	2	1	1.96620	46.129	1.0
9	2	0	2	1.90280	47.760	5.0
10	3	3	1	1.84900	49.241	11.0
11	2	2	2	1.81620	50.191	24.0
12	1	6	1	1.78840	51.027	3.0
13	2	6	0	1.75460	52.082	16.0
14	3	4	1	1.71500	53.379	1.0
15	3	1	2	1.63220	57.083	2.0
16	0	8	0	1.51960	60.916	2.0
17	3	3	2	1.50990	61.350	2.0
18	0	8	1	1.44040	64.658	5.0
19	0	3	3	1.41570	65.928	1.0
20	1	3	3	1.38730	67.456	1.0
21	2	2	3	1.35260	69.430	7.0
22	2	8	1	1.33260	70.626	2.0
23	1	4	3	1.32810	70.901	1.0
24	1	5	3	1.26220	75.220	3.0
25	5	5	0	1.21510	78.683	3.0
26	3	3	3	1.21070	79.025	12.0
27	5	0	2	1.19290	80.442	1.0
28	2	8	2	1.18740	80.892	13.0
29	5	5	1	1.17570	82.037	10.0
30	5	2	2	1.17060	82.301	12.0
31	3	9	0	1.16940	82.404	12.0
32	1	9	2	1.14450	84.605	1.0
33	4	1	3	1.13910	85.100	1.0
34	0	0	4	1.13300	85.668	1.0
35	3	9	1	1.13230	85.734	1.0
36	3	5	3	1.12480	86.445	2.0

### Name and formula

Reference code: 00-006-0663  
Compound name: Carbon Chromium  
Empirical formula:  $C_2Cr_7$   
Chemical formula:  $Cr_7C_3$

### Crystallographic parameters

Crystal system: Orthorhombic  
a (Å): 7.0149  
b (Å): 12.1530  
c (Å): 4.5320  
Alpha (°): 90.0000  
Beta (°): 90.0000  
Gamma (°): 90.0000  
Volume of cell ( $10^6 \text{ pm}^3$ ): 386.36  
RIR: -

### Status, subfiles and quality

Status: Marked as deleted by ICDD  
Subfiles: Alloy, metal or intermetallic  
Inorganic  
Quality: Low precision (D)

### Comments

Creation Date: 1/1/1970  
Modification Date: 1/11/2011  
Deleted Or Rejected By: Delete: Weissmann parcel March 30, 1959.

### References

Primary reference: Crafts, Lamont., *Trans. Am. Inst. Min. Eng.*, **105**, 957, (1949)

### Peak list

No.	h	k	l	d (Å)	2Theta(deg)	I (%)
1	2	3	1	2.28000	39.492	50.0
2	1	1	2	2.11000	42.824	50.0
3	1	2	2	2.03000	44.600	100.0
4	2	5	0	2.01000	45.068	20.0
5	2	1	2	1.89000	48.104	10.0
6	3	3	1	1.84000	49.498	20.0
7				1.80000	50.674	40.0
8	0	7	0	1.74000	52.553	30.0
9	3	4	2	1.43000	65.186	20.0
10	5	0	1	1.34000	70.178	20.0
11				1.32000	71.403	10.0
12				1.25000	76.084	10.0
13	1	10	0	1.19900	79.950	40.0
14				1.17500	81.926	40.0
15	6	1	0	1.16300	83.957	30.0
16				1.15900	83.307	30.0

## Name and formula

Reference code: 00-011-0950  
Compound name: Chromium Carbide  
Empirical formula:  $C_3Cr_7$   
Chemical formula:  $Cr_7C_3$

## Crystallographic parameters

Crystal system: Hexagonal  
Space group:  $P6_3/c$   
Space group number: 159

a (Å): 13.9800  
b (Å): 13.9800  
c (Å): 4.5230  
Alpha (°): 90.0000  
Beta (°): 90.0000  
Gamma (°): 120.0000

Calculated density (g/cm<sup>3</sup>): 6.94  
Measured density (g/cm<sup>3</sup>): 6.90  
Volume of cell (10<sup>-6</sup> pm<sup>3</sup>): 765.55  
Z: 6.00

RIR: -

## Subfiles and quality

Subfiles: Alloy, metal or intermetallic  
Common Phase  
Inorganic  
Quality: Blank (B)

## Comments

Creation Date: 1/1/1970  
Modification Date: 1/11/2011  
General Comments: X-ray diffraction pattern is free of carbide impurities. Metallographic studies showed contamination only by a very small volume fraction of inclusions, probably oxides (not detected in the X-ray pattern)  
Sample Preparation: Sample prepared in a multiple hearth button furnace; water cooled copper crucible; argon atmosphere; arc rotated electromagnetically for uniform melting; annealed at a high temperature for about 8 hours  
Sample Source or Locality: Work initiated by Andre Amy, J., Department of Chemistry, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, USA  
Unit Cell Data Source: Powder Diffraction.

## References

Primary reference: Westbrook, J., Research Laboratory, General Electric Company, Schenectady, New York, USA., *Private Communication*  
Unit cell: Westgren, *Aerikontoret Ann.*, **119**, 231, (1935)

## Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta(deg)	I (%)
1	3	1	1	2.68000	33.408	20.0
2	3	2	1	2.35000	38.269	20.0
3	4	1	1	2.28000	39.492	70.0
4	1	0	2	2.22000	40.606	50.0
5	5	0	1	2.14000	42.195	50.0
6	2	0	2	2.12000	42.612	70.0
7	4	2	1	2.04000	44.370	100.0
8	6	0	0	2.02000	44.833	50.0
9	5	1	1	1.96000	46.284	70.0
10	2	2	2	1.90000	47.835	50.0
11	6	0	1	1.84000	49.498	60.0
12	4	0	2	1.81000	50.375	70.0
13	5	2	1	1.78000	51.285	50.0
14	4	4	0	1.75000	52.230	70.0
15	6	1	1	1.71000	53.547	60.0
16	3	3	2	1.62000	56.783	60.0
17	7	1	1	1.61000	61.345	50.0
18	8	0	1	1.43500	64.931	70.0
19	4	0	3	1.35000	69.583	80.0
20	6	4	1	1.33000	70.785	50.0
21	8	2	0	1.32000	71.403	30.0
22	9	0	1	1.29000	73.330	30.0
23	5	0	3	1.28000	73.997	60.0
24	9	1	0	1.27000	74.679	30.0
25	4	2	3	1.26000	75.374	70.0
26	5	1	3	1.24000	76.809	20.0
27				1.22700	77.775	60.0
28				1.21500	78.690	60.0
29	7	4	1	1.21000	79.079	80.0
30	9	2	0	1.19400	80.353	50.0
31	5	5	2	1.18800	80.842	100.0
32				1.17400	82.011	70.0
33	10	0	1	1.17000	82.352	100.0

### Name and formula

Reference code:	01-089-7244
Compound name:	Chromium Carbide
Empirical formula:	$C_3Cr_7$
Chemical formula:	$Cr_7C_3$

### Crystallographic parameters

Crystal system:	Orthorhombic
Space group:	Prima
Space group number:	62
a (Å):	4.5240
b (Å):	7.0100
c (Å):	12.1420
Alpha (°):	90.0000
Beta (°):	90.0000
Gamma (°):	90.0000
Volume of cell ( $10^{-6} \text{ pm}^3$ ):	385.23
Z:	4.00
RIR:	1.02

### Status, subfiles and quality

Status:	Marked as deleted by ICDD
Subfiles:	Alloy, metal or intermetallic ICSD Pattern Inorganic Indexed (f)
Quality:	

### Comments

ANK:	N307
Creation Date:	11/20/2008
Modification Date:	1/19/2011

ANX: N307  
 Analysis: C3 G7  
 Formula from original source: C7 C3  
 ICSD Collection Code: 76799  
 Minor Warning: 7% <R factor <12% (for single crystal)  
 Wyckoff Sequence: d3 c4 (FMM)  
 Unit Cell Data Source: Single Crystal.

## References

Primary reference: *Calculated from ICSD using POWD-J24+*  
 Structure: Rouault, M.A., Herpin, P., Fruchart, M.R., *Ann. Chim. (Paris)*, 5, 461, (1970)

## Peak list

No.	h	k	l	d (Å)	2 Theta(deg)	I (%)
1	0	0	2	6.07090	14.579	0.8
2	0	1	1	6.07090	14.579	0.8
3	1	0	1	4.24100	20.930	0.1
4	1	1	1	3.62860	24.513	0.1
5	1	0	2	3.62860	24.513	0.1
6	0	2	0	3.50510	25.391	0.1
7	0	1	3	3.50510	25.391	0.1
8	1	1	2	3.22250	27.660	1.2
9	0	0	4	3.03540	29.402	1.7
10	0	2	2	3.03540	29.402	1.7
11	1	0	3	3.01700	29.585	2.4
12	1	2	1	2.70170	33.132	4.7
13	1	0	4	2.52100	35.583	0.1
14	1	2	2	2.52100	35.583	0.1
15	1	1	4	2.37230	37.896	2.6
16	0	3	1	2.29460	39.230	34.5
17	0	2	4	2.29460	39.230	34.5
18	1	2	3	2.28660	39.373	16.3
19	2	0	0	2.26300	39.801	2.2
20	2	0	1	2.22470	40.516	6.7
21	2	1	0	2.15360	41.916	2.3
22	1	0	5	2.13980	42.199	10.7
23	2	0	2	2.12050	42.601	45.9
24	2	1	1	2.12050	42.601	45.9
25	1	2	4	2.04660	44.219	100.0
26	1	3	1	2.04660	44.219	100.0
27	2	1	2	2.02960	44.610	2.5
28	0	3	3	2.02360	44.749	12.0
29	0	0	6	2.02360	44.749	12.0
30	1	3	2	1.96460	46.169	16.8
31	2	2	0	1.90120	47.803	4.7
32	2	1	3	1.90120	47.803	4.7
33	2	2	1	1.87830	48.423	0.2
34	1	0	6	1.84740	49.286	10.4
35	1	3	3	1.84740	49.286	10.4
36	1	2	5	1.82640	49.891	1.2
37	2	0	4	1.81430	50.247	24.1
38	2	2	2	1.81430	50.247	24.1
39	1	1	6	1.78660	51.088	5.4
40	0	4	0	1.75250	52.150	15.5
41	0	2	6	1.75250	52.150	15.5
42	2	2	3	1.72080	53.185	1.7
43	1	3	4	1.71370	53.423	7.4
44	0	3	5	1.68380	54.449	0.5
45	0	4	2	1.68380	54.449	0.5
46	2	0	5	1.65560	55.455	0.6
47	2	3	0	1.62560	56.570	0.6
48	1	0	7	1.61970	56.794	3.2
49	1	4	1	1.61970	56.794	3.2
50	2	2	4	1.61120	57.122	1.7
51	2	3	1	1.61120	57.122	1.7
52	2	3	2	1.57030	58.753	0.8
53	0	4	4	1.51770	61.001	1.6
54	0	0	8	1.51770	61.001	1.6
55	1	4	3	1.51540	61.103	1.3
56	2	3	3	1.50850	61.413	1.0
57	2	0	6	1.50850	61.413	1.0
58	2	2	5	1.49700	61.936	0.1
59	3	0	1	1.49700	61.936	0.1
60	2	1	6	1.47470	62.979	0.3
61	1	2	7	1.47030	63.189	0.1
62	3	0	2	1.46410	63.488	0.6
63	3	1	1	1.46410	63.488	0.6
64	1	3	6	1.44920	64.218	0.1
65	1	4	4	1.43900	64.729	4.2
66	1	0	8	1.43900	64.729	4.2
67	3	1	2	1.43300	65.033	0.3
68	2	3	4	1.43300	65.033	0.3
69	3	0	3	1.41360	66.039	0.1
70	1	1	8	1.40960	66.250	0.1

71	0	2	8	1.39280	67.154	0.3
72	0	5	1	1.39280	67.154	0.3
73	2	4	0	1.38560	67.550	0.7
74	2	2	6	1.38560	67.550	0.7
75	2	4	1	1.37680	68.040	0.4
76	3	2	1	1.37680	68.040	0.4
77	1	4	5	1.35580	69.243	0.2
78	2	4	2	1.35100	69.524	7.1
79	3	2	2	1.35100	69.524	7.1
80	1	5	1	1.33120	70.711	2.1
81	1	3	7	1.33120	70.711	2.1
82	0	1	9	1.32480	71.105	0.6
83	0	5	3	1.32480	71.105	0.6
84	3	2	3	1.31100	71.969	0.4
85	2	4	3	1.31100	71.969	0.4
86	1	5	2	1.30780	72.173	0.2
87	1	0	9	1.29290	73.138	0.3
88	2	2	7	1.28140	73.903	1.3
89	3	0	5	1.28140	73.903	1.3
90	1	4	6	1.27140	74.583	0.5
91	1	5	3	1.27140	74.583	0.5
92	2	3	6	1.26730	74.865	0.2
93	3	2	4	1.26060	75.332	2.2
94	2	4	4	1.26060	75.332	2.2
95	2	1	8	1.24070	76.758	0.4
96	3	3	2	1.24070	76.758	0.4
97	1	3	8	1.22530	77.903	1.2
98	1	5	4	1.22530	77.903	1.2
99	0	5	5	1.21420	78.752	2.4
100	1	2	9	1.21420	78.752	2.4
101	3	0	6	1.20950	79.118	11.2
102	3	3	3	1.20950	79.118	11.2
103	3	2	5	1.20350	79.591	0.2
104	2	4	5	1.20350	79.591	0.2
105	2	5	0	1.19180	80.531	0.6
106	3	1	6	1.19180	80.531	0.6
107	1	4	7	1.18950	80.719	0.7
108	2	5	1	1.18610	80.999	11.5
109	2	2	8	1.18610	80.999	11.5
110	1	0	10	1.17270	82.122	8.0
111	1	5	5	1.17270	82.122	8.0
112	0	3	9	1.16840	82.490	9.0
113	0	6	0	1.16840	82.490	9.0
114	2	0	9	1.15880	83.325	0.2
115	1	1	10	1.15670	83.510	0.7
116	0	6	2	1.14730	84.351	0.1
117	0	4	8	1.14730	84.351	0.1
118	2	5	3	1.14330	84.715	1.0
119	2	4	6	1.14330	84.715	1.0
120	3	0	7	1.13830	85.174	0.2
121	3	4	1	1.13830	85.174	0.2
122	4	0	0	1.13150	85.809	1.5
123	1	3	9	1.13150	85.809	1.5
124	4	0	1	1.12660	86.273	0.7
125	1	6	1	1.12660	86.273	0.7
126	3	4	2	1.12360	86.560	1.2
127	3	3	5	1.12360	86.560	1.2
128	4	1	0	1.11680	87.219	1.7
129	1	5	6	1.11680	87.219	1.7
130	4	1	1	1.11230	87.661	0.7
131	1	6	2	1.11230	87.661	0.7
132	2	5	4	1.10940	87.949	1.2
133	2	3	8	1.10940	87.949	1.2
134	3	4	3	1.10020	88.877	0.5
135	2	2	9	1.10020	88.877	0.5
136	4	1	2	1.09860	89.041	0.1
137	1	6	3	1.08950	89.986	0.2
138	4	0	3	1.08950	89.986	0.2
139	2	4	7	1.08260	90.719	0.1
140	3	2	7	1.08260	90.719	0.1
141	4	2	0	1.07680	91.345	0.1
142	4	1	3	1.07680	91.345	0.1
143	1	0	11	1.07240	91.828	0.6
144	4	2	1	1.07240	91.828	0.6
145	2	5	5	1.07000	92.094	1.6
146	3	4	4	1.07000	92.094	1.6
147	1	6	4	1.06020	93.198	0.7
148	4	2	2	1.06020	93.198	0.7
149	2	1	10	1.05770	93.485	0.1
150	3	1	8	1.05770	93.485	0.1
151	1	3	10	1.04830	94.582	0.3
152	4	1	4	1.04830	94.582	0.3
153	1	4	9	1.04060	95.505	0.2
154	4	2	3	1.04060	95.505	0.2
155	2	6	0	1.03820	95.797	0.6
156	2	3	9	1.03820	95.797	0.6

157	2	6	1	1.03440	96.264	0.4
158	3	4	5	1.03440	96.264	0.4
159	2	5	6	1.02700	97.189	0.3
160	1	6	5	1.02540	97.392	0.9
161	1	2	11	1.02540	97.392	0.9
162	2	4	8	1.02330	97.660	2.7
163	2	6	2	1.02330	97.660	2.7
164	4	3	0	1.01640	98.293	0.1
165	4	3	1	1.01480	98.764	0.7
166	4	2	4	1.01480	98.764	0.7
167	3	5	2	1.01260	99.055	0.1
168	0	0	12	1.01180	99.161	0.1
169	0	6	6	1.01180	99.161	0.1
170	1	5	8	1.00440	100.157	0.3
171	4	3	2	1.00440	100.157	0.3
172	0	4	10	0.99800	101.039	0.2
173	0	7	1	0.99800	101.039	0.2
174	3	5	3	0.99550	101.389	1.2
175	3	4	6	0.99550	101.389	1.2
176	2	0	11	0.99210	101.870	0.1
177	1	6	6	0.98740	102.545	0.6
178	1	0	12	0.98740	102.545	0.6
179	4	2	5	0.98440	102.981	0.1
180	2	1	11	0.98230	103.290	1.7
181	2	6	4	0.98230	103.290	1.7
182	4	1	6	0.97780	103.959	0.1
183	1	1	12	0.97780	103.959	0.1
184	1	7	1	0.97460	104.441	0.9
185	1	4	10	0.97460	104.441	0.9
186	2	3	10	0.97280	104.715	0.3
187	3	5	4	0.97280	104.715	0.3
188	0	7	3	0.97210	104.822	0.3
189	0	2	12	0.97210	104.822	0.3
190	4	3	4	0.96530	105.877	0.5
191	1	7	2	0.96530	105.877	0.5
192	2	2	11	0.95460	107.595	0.1
193	2	6	5	0.95460	107.595	0.1
194	1	7	3	0.95060	108.256	1.2
195	4	2	6	0.95060	108.256	1.2
196	1	6	7	0.94750	108.777	0.3
197	4	4	1	0.94750	108.777	0.3
198	3	0	10	0.94590	109.048	0.3
199	3	5	5	0.94590	109.048	0.3

## Name and formula

Reference code: 01-089-5902  
Compound name: Chromium Carbide  
Empirical formula:  $C_3Cr_7$   
Chemical formula:  $Cr_7C_3$

## Crystallographic parameters

Crystal system: Orthorhombic  
Space group: Pmcn  
Space group number: 62

a (Å): 7.0100  
b (Å): 12.1420  
c (Å): 4.5260  
Alpha (°): 90.0000  
Beta (°): 90.0000  
Gamma (°): 90.0000

Volume of cell ( $10^{-6} \text{ pm}^3$ ): 385.23  
Z: 4.00

RIR: 1.02

## Status, subfiles and quality

Status: Marked as deleted by ICSD  
Subfiles: Alloy, metal or intermetallic;  
ICSD Pattern  
Inorganic  
Quality: Low precision (D)

## Comments

ANX: N307  
Creation Date: 11/20/2008  
Modification Date: 1/9/2011  
ANX: N307  
Analysis: C3 Cr7  
Formula from original source: Cr7 C3  
Deleted Or Rejected By: To be deleted by 01-089-7244, xyz incorrect, WFM 2/03  
ICSD Collection Code: 87129  
Calculated Pattern Original Remarks: Cell from 2nd ref  
(McMurdie et al., National Bureau of Standards): 7.0149(12), 12.153(4), 4.5320(4)  
AE: C1,2; Cr11 C3; Cr3,5; Cr11 C4; Cr4; Cr12 C5; C1,2; Cr8. Minor Warning: No e.s.d reported/abstracted on the cell dimension. 7% <R factor <12% (for single crystal). Wyckoff Sequence: d3 c4(PMCN). Unit Cell Data Source: Single Crystal.

## References

Primary reference: Rouault, M.A., Herpin, P., Fruchart, M.R., *Powder Diff.*, **1**, 77, (1986)  
Structure: Rouault, M.A., Herpin, P., Fruchart, M.R., *Ann. Chim. (Paris)*, **5**, 461, (1970)

## Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	0	2	0	6.07090	14.579	0.8
2	1	1	0	6.07090	14.579	0.8
3	0	1	1	4.24100	20.930	0.1
4	1	1	1	3.62860	24.513	0.1
5	0	2	1	3.62860	24.513	0.1
6	2	0	0	3.50510	25.391	0.1
7	1	3	0	3.50510	25.391	0.1
8	1	2	1	3.22250	27.660	1.3
9	0	4	0	3.03540	29.402	1.9
10	2	2	0	3.03540	29.402	1.9
11	0	3	1	3.01700	29.585	2.2
12	2	1	1	2.70170	33.132	4.9
13	0	4	1	2.52100	35.583	0.1
14	2	2	1	2.52100	35.583	0.1
15	1	4	1	2.37230	37.896	2.6
16	3	1	0	2.29460	39.230	35.0
17	2	4	0	2.29460	39.230	35.0
18	2	3	1	2.26660	39.373	16.2
19	0	0	2	2.26300	39.601	2.2
20	0	1	2	2.22470	40.516	6.6
21	1	0	2	2.15260	41.916	2.4
22	0	5	1	2.13980	42.199	11.1
23	0	2	2	2.12050	42.601	46.6
24	1	1	2	2.12050	42.601	46.6
25	1	5	1	2.04660	44.219	100.0



26	3	1	1	2.04660	44,219	100.0
27	1	2	2	2.03960	44,610	2.4
28	3	3	0	2.03360	44,749	12.1
29	0	6	0	2.02360	44,749	12.1
30	3	2	1	1.96460	46,169	16.6
31	2	0	2	1.90120	47,803	4.7
32	1	3	2	1.90120	47,803	4.7
33	2	1	2	1.87850	48,423	0.2
34	0	6	1	1.84740	49,286	10.4
35	3	3	1	1.84740	49,286	10.4
36	2	5	1	1.82640	49,891	1.2
37	0	4	2	1.81450	50,247	24.6
38	2	2	2	1.81450	50,247	24.6
39	1	6	1	1.78640	51,088	5.6
40	4	0	0	1.75250	52,150	15.7
41	2	6	0	1.75250	52,150	15.7
42	2	3	2	1.72080	53,185	1.7
43	3	4	1	1.71370	53,423	7.5
44	3	5	0	1.68380	54,449	0.4
45	4	2	0	1.68380	54,449	0.4
46	0	5	2	1.65560	55,455	0.5
47	3	0	2	1.62560	56,570	0.6
48	0	7	1	1.61970	56,794	3.4
49	4	1	1	1.61970	56,794	3.4
50	2	4	2	1.61120	57,122	1.7
51	3	1	2	1.61120	57,122	1.7
52	3	2	2	1.57030	58,753	0.7
53	4	4	0	1.51770	61,001	1.6
54	0	8	0	1.51770	61,001	1.6
55	4	3	1	1.51540	61,103	1.3
56	3	3	2	1.50850	61,413	1.1
57	0	6	2	1.50850	61,413	1.1
58	2	5	2	1.49700	61,936	0.1
59	0	1	3	1.49700	61,936	0.1
60	1	6	2	1.47470	62,979	0.3
61	2	7	1	1.47030	63,189	0.1
62	1	1	3	1.46410	63,488	0.6
63	0	2	3	1.46410	63,488	0.6
64	3	6	1	1.44920	64,218	0.1
65	4	4	1	1.43900	64,729	4.1
66	0	8	1	1.43900	64,729	4.1
67	3	4	2	1.43300	65,033	0.4
68	1	2	3	1.43300	65,033	0.4
69	0	3	3	1.41360	66,039	0.1
70	5	1	0	1.39280	67,154	0.3
71	3	7	0	1.39280	67,154	0.3
72	2	6	2	1.38560	67,550	0.7
73	4	0	2	1.38560	67,550	0.7
74	2	1	3	1.37680	68,040	0.4
75	4	1	2	1.37680	68,040	0.4
76	4	5	1	1.35580	69,245	0.2
77	2	2	3	1.35100	69,524	7.0
78	4	2	2	1.35100	69,524	7.0
79	3	7	1	1.33120	70,711	2.2
80	5	1	1	1.33120	70,711	2.2
81	1	9	0	1.32480	71,105	0.8
82	5	3	0	1.32480	71,105	0.8
83	4	3	2	1.31100	71,969	0.5
84	2	3	3	1.31100	71,969	0.5
85	5	2	1	1.30780	72,173	0.2
86	0	9	1	1.29290	73,138	0.3
87	0	5	3	1.28140	73,903	1.2
88	2	7	2	1.28140	73,903	1.2
89	4	6	1	1.27140	74,583	0.6
90	5	3	1	1.27140	74,583	0.6
91	3	6	2	1.26730	74,865	0.2
92	4	4	2	1.26060	75,332	2.3
93	2	4	3	1.26060	75,332	2.3
94	3	2	3	1.24070	76,758	0.5
95	1	8	2	1.24070	76,758	0.5
96	5	4	1	1.22530	77,903	1.2
97	3	8	1	1.22530	77,903	1.2
98	2	9	1	1.21420	78,752	2.5
99	5	5	0	1.21420	78,752	2.5
100	3	3	3	1.20950	79,118	11.2
101	0	6	3	1.20950	79,118	11.2
102	4	5	2	1.20350	79,591	0.2
103	2	5	3	1.20350	79,591	0.2
104	5	0	2	1.19180	80,531	0.9
105	1	6	3	1.19180	80,531	0.9
106	4	7	1	1.18950	80,719	0.7
107	2	8	2	1.18610	80,999	11.6
108	5	1	2	1.18610	80,999	11.6
109	5	5	1	1.17270	82,122	8.1
110	0	10	1	1.17270	82,122	8.1
111	6	0	0	1.16840	82,490	9.0

112	3	9	0	1.16640	82.490	9.0
113	0	9	2	1.15980	83.325	0.2
114	1	10	1	1.15670	83.510	0.7
115	6	2	0	1.14730	84.351	0.1
116	4	8	0	1.14730	84.351	0.1
117	1	9	2	1.14330	84.715	1.0
118	5	3	2	1.14330	84.715	1.0
119	4	1	3	1.13830	85.174	0.2
120	0	7	3	1.13830	85.174	0.2
121	3	9	1	1.13150	85.809	1.6
122	0	0	4	1.13150	85.809	1.6
123	6	1	1	1.12660	86.273	0.7
124	0	1	4	1.12660	86.273	0.7
125	4	2	3	1.12360	86.560	1.3
126	3	5	3	1.12360	86.560	1.3
127	5	6	1	1.11680	87.219	1.7
128	1	0	4	1.11680	87.219	1.7
129	6	2	1	1.11230	87.661	0.7
130	1	1	4	1.11230	87.661	0.7
131	3	8	2	1.10940	87.949	1.1
132	5	4	2	1.10940	87.949	1.1
133	2	9	2	1.10020	88.877	0.5
134	4	3	3	1.10020	88.877	0.5
135	1	2	4	1.09860	89.041	0.1
136	0	3	4	1.08950	89.986	0.2
137	6	3	1	1.08950	89.986	0.2
138	4	7	2	1.08260	90.719	0.1
139	2	7	3	1.08260	90.719	0.1
140	2	0	4	1.07680	91.345	0.1
141	1	3	4	1.07680	91.345	0.1
142	2	1	4	1.07240	91.828	0.7
143	0	11	1	1.07240	91.828	0.7
144	4	4	3	1.07000	92.094	1.5
145	5	5	2	1.07000	92.094	1.5
146	2	2	4	1.06020	93.198	0.7
147	6	4	1	1.06020	93.198	0.7
148	1	10	2	1.05770	93.485	0.1
149	1	8	3	1.05770	93.485	0.1
150	1	4	4	1.04830	94.582	0.3
151	3	10	1	1.04830	94.582	0.3
152	2	3	4	1.04060	95.505	0.2
153	4	9	1	1.04060	95.505	0.2
154	3	9	2	1.03820	95.797	0.7
155	6	0	2	1.03820	95.797	0.7
156	4	5	3	1.03440	96.264	0.4
157	6	1	2	1.03440	96.264	0.4
158	5	6	2	1.02700	97.189	0.3
159	2	11	1	1.02540	97.392	0.9
160	6	5	1	1.02540	97.392	0.9
161	6	2	2	1.02330	97.660	2.7
162	2	10	2	1.02330	97.660	2.7
163	3	0	4	1.01840	98.293	0.1
164	3	1	4	1.01480	98.764	0.8
165	2	4	4	1.01480	98.764	0.8
166	5	2	3	1.01260	99.055	0.1
167	0	12	0	1.01180	99.161	0.1
168	6	6	0	1.01180	99.161	0.1
169	3	2	4	1.00440	100.157	0.3
170	5	8	1	1.00440	100.157	0.3
171	7	1	0	0.99810	101.026	0.2
172	4	10	0	0.99810	101.026	0.2
173	4	6	3	0.99550	101.389	1.2
174	5	3	3	0.99550	101.389	1.2
175	0	11	2	0.99210	101.870	0.1
176	6	6	1	0.98740	102.545	0.6
177	0	12	1	0.98740	102.545	0.6
178	2	5	4	0.98440	102.991	0.1
179	6	4	2	0.98230	103.290	1.7
180	1	11	2	0.98230	103.290	1.7
181	1	6	4	0.97780	103.959	0.1
182	1	12	1	0.97780	103.959	0.1
183	3	11	1	0.97460	104.441	1.0
184	7	1	1	0.97460	104.441	1.0
185	5	4	3	0.97280	104.715	0.3
186	3	10	2	0.97280	104.715	0.3
187	2	12	0	0.97210	104.822	0.3
188	7	3	0	0.97210	104.822	0.3
189	7	2	1	0.96530	105.877	0.5
190	3	4	4	0.96530	105.877	0.5
191	2	11	2	0.95460	107.595	0.1
192	6	5	2	0.95460	107.595	0.1
193	7	3	1	0.95060	108.256	1.3
194	2	6	4	0.95060	108.256	1.3
195	6	7	1	0.94750	108.777	0.4
196	4	1	4	0.94750	108.777	0.4
197	5	5	3	0.94590	109.048	0.3

## Name and formula

Reference code: 01-071-3769  
Compound name: Chromium Carbide  
Empirical formula:  $\text{Cr}_3\text{C}_7$   
Chemical formula:  $\text{Cr}_7\text{C}_3$

## Crystallographic parameters

Crystal system: Hexagonal  
Space group:  $\text{P6}_3\text{mc}$   
Space group number: 186

a (Å): 14.0100  
b (Å): 14.0100  
c (Å): 4.5320  
Alpha (°): 90.0000  
Beta (°): 90.0000  
Gamma (°): 120.0000

Volume of cell ( $10^{-6} \text{ nm}^3$ ): 770.37  
Z: 6.00

RIR: 1.81

## Subfiles and quality

Subfiles: Alloy, metal or intermetallic  
ICSD Pattern  
Inorganic  
Indexed (j)

Quality:

## Comments

ANK: N307  
Creation Date: 11/15/2010  
Modification Date: 1/19/2011  
ANK: N307  
ICSD Collection Code: 52289  
Calculated Pattern Original Remarks: Preliminary structure, cf. 67129  
Cell of Mn7 C3: 13.90, 4.54  
Cell of Mn7 C3 (2nd ref., Butler et al.): 13.870, 4.541; of (Mn.65 Fe.35)7 C3: 13.820, 4.532. Minor Warning: No e.s.d reported/abstracted on the cell dimension. No R factors reported/abstracted. Unit Cell Data Source: Single Crystal.

## References

Primary reference: Westgren, A., *Trans. Met. Soc. AIME* **221**, 470, (1961)  
Structure: Westgren, A., *Jernkontorets Ann.*, **1935**, 231, (1935)

## Peak list

No.	h	k	l	d (Å)	2Theta(deg)	I (%)
1	1	0	0	12.13300	7.280	0.1
2	1	1	0	7.00500	12.627	0.1
3	2	0	0	6.06650	14.590	0.0
4	1	0	1	4.24550	20.907	45.3
5	2	0	1	3.63070	24.498	17.4
6	2	2	0	3.50250	25.410	0.5
7	2	1	1	3.22350	27.651	73.8
8	4	0	0	3.03320	29.423	8.2
9	3	0	1	3.01750	29.580	21.5
10	3	1	1	2.70180	33.130	39.2
11	4	0	1	2.62080	35.586	29.2
12	3	2	1	2.37190	37.902	13.1
13	4	2	0	2.29290	39.261	60.0
14	4	1	1	2.28610	39.382	33.8
15	0	0	2	2.26600	39.746	1.0
16	5	0	1	2.13920	42.211	21.3
17	2	0	2	2.12280	42.553	100.0
18	4	2	1	2.04600	44.233	12.8
19	6	0	0	2.02220	44.782	19.8
20	5	1	1	1.96390	46.187	42.6
21	2	2	2	1.90260	47.766	6.1
22	6	0	1	1.84670	49.306	7.4
23	4	3	1	1.82560	49.915	5.1
24	4	0	2	1.81540	50.215	48.5
25	5	2	1	1.78570	51.109	16.6
26	4	4	0	1.75120	52.191	23.3
27	6	1	1	1.71300	53.446	11.3
28	6	2	0	1.68260	54.491	0.1
29	7	0	1	1.61890	56.825	16.2

30	4	2	2	1.61170	57.102	1.6
31	6	2	1	1.57740	58.462	3.7
32	7	1	1	1.51460	61.139	4.4
33	6	0	2	1.50880	61.399	4.4
34	1	0	3	1.49910	61.840	1.3
35	4	3	2	1.49910	61.840	1.3
36	5	4	1	1.46950	63.228	9.4
37	2	0	3	1.46590	63.401	1.1
38	6	3	1	1.44840	64.258	4.6
39	8	0	1	1.43820	64.769	0.6
40	6	1	2	1.43480	64.942	3.7
41	2	1	3	1.43480	64.942	3.7
42	3	0	3	1.41520	65.954	1.3
43	7	2	1	1.40980	66.292	7.0
44	6	4	0	1.39180	67.209	0.2
45	4	4	2	1.38570	67.544	2.8
46	3	1	3	1.37820	67.962	2.8
47	7	0	2	1.37820	67.962	2.8
48	8	1	1	1.35510	69.284	1.0
49	6	2	2	1.35220	69.454	2.5
50	4	0	3	1.35220	69.454	2.5
51	6	4	1	1.33040	70.760	0.8
52	3	2	3	1.32770	70.926	1.2
53	8	2	0	1.32380	71.167	1.4
54	7	1	2	1.31210	71.899	3.0
55	4	1	3	1.31210	71.899	3.0
56	7	3	1	1.30710	72.218	2.4
57	9	0	1	1.29220	73.184	0.9
58	5	0	3	1.28250	73.829	2.2
59	5	4	2	1.28250	73.829	2.2
60	8	2	1	1.27070	74.631	0.2
61	6	5	0	1.27070	74.631	0.2
62	4	2	3	1.26150	75.269	1.9
63	8	0	2	1.26040	75.346	2.0
64	7	2	2	1.24150	76.699	5.5
65	5	1	3	1.24150	76.699	5.5
66	6	5	1	1.22440	77.956	5.6
67	7	4	1	1.21330	78.822	3.9
68	10	0	0	1.21330	78.822	3.9
69	6	0	3	1.21020	79.064	1.3
70	4	3	3	1.20430	79.528	0.7
71	8	1	2	1.20430	79.528	0.7
72	5	5	2	1.19260	80.466	2.9
73	5	2	3	1.19260	80.466	2.9
74	8	3	1	1.18880	80.777	4.4
75	6	4	2	1.18590	81.015	23.8
76	10	0	1	1.17200	82.181	1.4
77	7	3	2	1.17020	82.335	2.6
78	6	1	3	1.17020	82.335	2.6
79	6	6	0	1.16750	82.567	15.7
80	9	2	1	1.15600	83.572	0.9
81	8	4	0	1.14650	84.423	0.2
82	8	2	2	1.14300	84.742	1.4
83	7	0	3	1.13880	85.128	3.2
84	0	0	4	1.13100	85.668	6.4
85	7	5	1	1.12570	86.359	0.7
86	6	2	3	1.12410	86.512	0.8
87	10	1	1	1.11410	87.287	2.4
88	8	4	1	1.11140	87.750	0.3
89	7	1	3	1.10070	88.826	0.9
90	2	1	4	1.10070	88.826	0.9
91	10	2	0	1.08880	90.060	0.7
92	9	3	1	1.08880	90.060	0.7
93	8	3	2	1.08300	90.676	2.2
94	5	4	3	1.08300	90.676	2.2
95	2	2	4	1.07800	91.215	0.1
96	6	3	3	1.07450	91.597	1.2
97	3	1	4	1.07450	91.597	1.2
98	11	0	1	1.07170	91.905	1.2
99	8	0	3	1.06960	92.138	0.7
100	10	0	2	1.06960	92.138	0.7
101	4	0	4	1.06140	93.061	0.3
102	10	2	1	1.05940	93.289	1.2
103	7	2	3	1.05800	93.450	1.9
104	9	2	2	1.05800	93.450	1.9
105	7	6	1	1.04750	94.677	0.1
106	8	5	1	1.03980	95.602	0.6
107	6	6	2	1.03780	95.846	0.1
108	8	1	3	1.03470	96.227	0.3
109	7	5	2	1.03470	96.227	0.3
110	11	1	1	1.02480	97.469	1.5
111	8	4	2	1.02300	97.699	4.0
112	6	4	3	1.02300	97.699	4.0
113	4	2	4	1.01580	98.632	3.6
114	7	3	3	1.01280	99.038	0.8
115	12	0	0	1.01110	99.254	0.4

116	9	0	3	1.00580	99.967	0.3
117	5	1	4	1.00580	99.967	0.3
118	10	3	1	1.00340	100.246	1.5
119	8	6	0	0.99730	101.137	0.1
120	8	2	3	0.99560	101.375	0.1
121	6	0	4	0.98840	102.400	1.7
122	12	0	1	0.98680	102.432	0.5
123	10	2	2	0.98200	103.334	3.2
124	11	2	1	0.97720	104.049	0.3
125	6	5	3	0.97300	104.685	2.1
126	10	4	0	0.97140	104.930	0.5
127	6	1	4	0.96680	105.642	0.5
128	7	4	3	0.96680	105.642	0.5
129	9	5	1	0.96470	105.972	1.0
130	9	4	2	0.95470	107.579	1.5
131	8	3	3	0.95470	107.579	1.5
132	4	4	4	0.95130	108.140	3.1
133	12	1	1	0.94690	108.878	1.9
134	10	0	3	0.94600	109.031	0.6
135	10	3	2	0.93750	110.501	0.4
136	9	2	3	0.93750	110.501	0.4
137	11	3	1	0.93010	111.827	0.1
138	12	2	0	0.92510	112.747	0.4
139	12	0	2	0.92330	113.084	0.7
140	7	5	3	0.92110	113.499	0.3
141	5	4	4	0.91580	114.518	1.2
142	10	1	3	0.91580	114.518	1.2
143	13	0	1	0.91410	114.850	0.6
144	8	6	2	0.91280	115.106	3.1
145	8	4	3	0.91280	115.106	3.1
146	9	6	1	0.90900	115.863	0.3
147	8	0	4	0.90770	116.126	0.3
148	12	2	1	0.90640	116.390	0.2
149	1	0	5	0.90390	116.903	0.2
150	7	2	4	0.90060	117.590	0.4
151	9	3	3	0.90060	117.590	0.4
152	10	5	1	0.89890	117.949	0.6
153	2	0	5	0.89640	118.482	0.1
154	13	1	0	0.89640	118.482	0.1
155	10	4	2	0.89280	119.263	0.4
156	11	0	3	0.89080	119.703	0.7
157	12	1	2	0.89080	119.703	0.7
158	2	1	5	0.88920	120.059	0.5
159	11	4	1	0.88450	121.124	0.9
160	3	0	5	0.88450	121.124	0.9
161	10	2	3	0.88370	121.308	0.7
162	13	1	1	0.87980	122.218	0.7
163	6	4	4	0.87870	122.478	0.1
164	7	6	3	0.87680	122.932	0.1
165	8	8	0	0.87520	123.319	0.5
166	3	1	5	0.87520	123.319	0.5
167	7	3	4	0.87220	124.054	0.3
168	8	5	3	0.87220	124.054	0.3
169	4	0	5	0.86850	124.980	0.4
170	12	3	1	0.86630	125.542	0.5
171	10	6	0	0.86630	125.542	0.5
172	11	1	3	0.86330	126.321	0.8
173	3	2	5	0.86190	126.690	0.3
174	8	2	4	0.86080	126.982	0.5
175	4	1	5	0.85750	127.873	1.1
176	9	7	1	0.85750	127.873	1.1
177	12	2	2	0.85650	128.148	0.3
178	10	6	1	0.85120	129.635	1.2
179	10	5	2	0.85050	129.836	1.1
180	10	3	3	0.85050	129.836	1.1
181	5	0	5	0.84910	130.241	0.5
182	13	2	1	0.84500	131.454	0.1
183	4	2	5	0.84290	132.091	0.4
184	12	4	0	0.84130	132.584	2.0
185	11	5	1	0.84130	132.584	2.0
186	5	1	5	0.83690	133.975	1.3
187	8	3	4	0.83430	134.823	0.2
188	11	2	3	0.83430	134.823	0.2
189	8	6	3	0.83230	135.490	0.2
190	10	0	4	0.82810	136.933	1.9

### Name and formula

Reference code: 00-006-0667  
Compound name: Carbon Chromium  
Empirical formula:  $C_3Cr_7$   
Chemical formula:  $Cr_7C_3$

### Crystallographic parameters

Crystal system: Unknown

RIR: -

### Status, subfiles and quality

Status: Marked as deleted by ICDD  
Subfiles: Alloy, metal or intermetallic  
Inorganic  
Quality: Low precision (Q)

### Comments

Creation Date: 1/1/1970  
Modification Date: 1/11/2011  
Deleted Or Rejected By: Deleted: SW parcel December 31, 1960, for 00-011-0550.

### References

Primary reference: Crafts, Lamont., *Trans. Am. Inst. Min. Eng.*, **105**, 957, (1949)

### Peak list

No.	h	k	l	d (Å)	2Theta(deg)	I (%)
1				2.27000	39.473	50.0
2				2.10000	43.038	60.0
3				2.02000	44.833	100.0
4				1.99000	45.547	20.0
5				1.90000	47.835	10.0
6				1.82000	50.079	30.0
7				1.79000	50.978	50.0
8				1.73000	52.880	30.0
9				1.59000	57.955	10.0
10				1.42000	65.703	30.0
11				1.34000	70.178	30.0
12				1.31500	71.716	20.0
13				1.24500	76.445	10.0
14				1.19500	80.272	50.0
15				1.17300	82.181	50.0
16				1.15900	83.307	30.0
17				1.15400	83.749	30.0

## Name and formula

Reference code: 01-079-4902  
Compound name: Iron Carbide  
Empirical formula:  $\text{CFe}_3$   
Chemical formula:  $\text{Fe}_3\text{C}$

## Crystallographic parameters

Crystal system: Orthorhombic  
Space group: *Prima*  
Space group number: 62

*a* (Å): 5.0787  
*b* (Å): 6.7297  
*c* (Å): 4.5144  
Alpha (°): 90.0000  
Beta (°): 90.0000  
Gamma (°): 90.0000

Volume of cell ( $10^{-6} \text{ pm}^3$ ): 154.29  
Z: 4.00

RIR: 1.85

## Status, subfiles and quality

Status: Alternate Pattern  
Subfiles: Alloy, metal or intermetallic  
Common Phase  
ICSD Pattern  
Inorganic  
Quality: Indexed (I)

## Comments

ANK: NO3  
Creation Date: 11/16/2010  
Modification Date: 1/22/2011  
ANK: NO3  
Analysis: C1 Fe3  
Formula from original source:  $\text{Fe}_3\text{C}$   
ICSD Collection Code: 653949  
Calculated Pattern Original Remarks: Authors gave structure in cab setting  
Minor Warning: No e.s.d reported/abstracted on the cell dimension  
Wyckoff Sequence: d c2 (Pn/m)  
Unit Cell Data Source: Powder Diffraction.

## References

Primary reference: *Calculated from ICSD using ROMD-12++*  
Structure: Meinhardt, O., Kirsbaum, O., *Arch. Eisenhuettenwes.*, 33, 493, (1962)

## Peak list

No.	h	k	l	d (Å)	2Theta (deg)	I (%)
1	0	1	1	3.74900	23.714	1.4
2	0	2	0	3.36480	26.468	2.0
3	1	0	1	3.36480	26.468	2.0
4	1	1	1	3.01620	29.593	1.4
5	2	0	0	2.53940	35.317	3.7
6	1	2	1	2.38260	37.725	33.1
7	2	1	0	2.37580	37.838	30.5
8	0	0	2	2.23720	39.908	21.8
9	2	0	1	2.21320	40.756	15.4
10	2	1	1	2.10240	42.986	55.4
11	1	0	2	2.06270	43.856	61.8
12	2	2	0	2.02890	44.672	59.1
13	0	3	1	2.00890	45.094	100.0
14	1	1	2	1.97210	45.984	51.0
15	1	3	1	1.86810	48.704	33.7
16	2	2	1	1.84910	49.238	53.4
17	1	2	2	1.75660	51.955	20.0
18	2	3	0	1.68120	54.840	12.7
19	0	4	0	1.68120	54.840	12.7
20	2	1	2	1.63640	56.163	5.9
21	3	0	1	1.58510	58.151	14.2
22	2	3	1	1.57550	58.540	1.4
23	3	1	1	1.54290	59.901	4.4
24	1	3	2	1.51840	60.970	0.7
25	2	2	2	1.50810	61.431	7.2

26	1	4	1	1.50560	61.544	2.5
27	0	1	3	1.46850	63.276	0.1
28	1	0	3	1.44280	64.538	0.1
29	3	2	1	1.43400	64.982	0.6
30	1	1	3	1.41070	66.192	1.7
31	2	4	0	1.40250	66.629	3.0
32	3	0	2	1.35430	69.331	0.1
33	2	3	2	1.34830	69.684	0.9
34	0	4	2	1.34830	69.684	0.9
35	2	4	1	1.33940	70.214	1.8
36	1	2	3	1.32400	71.031	14.8
37	1	4	2	1.30370	72.436	0.1
38	2	0	3	1.29450	73.033	0.3
39	3	3	1	1.29450	73.033	0.3
40	0	5	1	1.28980	73.343	1.6
41	2	1	3	1.27130	74.589	0.1
42	3	2	2	1.25640	75.628	3.8
43	0	3	3	1.25020	76.070	1.8
44	1	5	1	1.25020	76.070	1.8
45	4	0	1	1.22220	78.138	12.2
46	1	3	3	1.21350	78.807	14.6
47	2	2	3	1.20820	79.220	0.4
48	4	1	1	1.20240	79.663	1.2
49	2	4	2	1.19130	80.572	0.9
50	2	5	0	1.18920	80.744	5.7
51	3	3	2	1.15940	83.272	14.2
52	3	4	1	1.15370	83.776	0.8
53	2	5	1	1.15000	84.107	9.3
54	0	0	4	1.12860	86.083	3.0
55	1	5	2	1.12720	86.216	7.8
56	3	0	3	1.12470	86.455	9.3
57	0	6	0	1.12140	86.753	4.8
58	2	3	3	1.12140	86.753	4.8
59	3	1	3	1.10930	87.959	2.2
60	4	3	0	1.10500	88.390	9.2
61	1	0	4	1.10170	88.724	4.2
62	1	4	3	1.09520	89.391	2.4
63	1	1	4	1.08720	90.229	2.1
64	4	3	1	1.07330	91.729	0.1
65	0	2	4	1.07000	92.094	0.1
66	3	2	3	1.06470	92.462	1.1
67	3	4	2	1.05500	93.797	0.7
68	4	2	2	1.05210	94.135	2.0
69	2	5	2	1.05210	94.135	2.0
70	1	2	4	1.04700	94.736	1.0
71	2	0	4	1.03130	95.649	0.1
72	3	5	1	1.02400	97.316	1.1
73	2	4	3	1.02600	97.316	1.1
74	2	1	4	1.01940	98.163	0.7
75	4	4	0	1.01350	98.935	0.1
76	0	6	2	1.00440	100.157	0.9
77	2	6	1	1.00050	100.693	0.3
78	4	3	2	0.99240	101.828	2.6
79	5	0	1	0.99100	102.027	0.5
80	1	3	4	0.98890	102.328	1.0
81	4	4	1	0.98890	102.328	1.0
82	2	2	4	0.98540	102.835	3.3
83	1	6	2	0.98540	102.835	3.3
84	1	5	3	0.98420	103.011	3.4
85	5	1	1	0.98040	103.571	0.7
86	4	0	3	0.97040	105.083	0.1
87	4	1	3	0.96050	106.639	0.1
88	3	5	2	0.95470	107.579	1.5
89	5	2	1	0.95040	108.256	0.9
90	0	7	1	0.94030	110.011	1.3
91	0	4	4	0.93700	110.589	0.6
92	2	3	4	0.93700	110.589	0.6
93	3	4	3	0.93500	110.944	0.5
94	4	2	3	0.93300	111.302	0.1
95	2	5	3	0.93300	111.302	0.1
96	3	1	4	0.93000	111.845	0.1
97	1	7	1	0.92460	112.841	0.6
98	4	4	2	0.92460	112.841	0.6
99	4	5	0	0.92360	113.028	0.6
100	1	4	4	0.92170	113.386	0.1
101	5	1	2	0.91760	114.169	0.5
102	3	6	1	0.91560	114.557	1.6
103	3	2	4	0.90450	116.779	1.5
104	4	5	1	0.90450	116.779	1.5
105	2	7	0	0.89910	117.906	0.1
106	0	1	5	0.89490	118.806	0.1
107	5	2	2	0.89310	119.197	3.1
108	4	3	3	0.89060	119.748	0.1
109	1	0	5	0.88890	120.126	0.1
110	1	6	3	0.88550	120.895	0.2
111	2	7	1	0.88180	121.749	0.1



112	1	1	5	0.08180	121.749	0.1
113	2	4	4	0.87930	122.336	0.3
114	1	7	2	0.87140	124.252	0.5
115	3	3	4	0.86620	125.567	4.7
116	3	5	3	0.86300	126.400	1.5
117	1	2	5	0.85950	127.331	0.8
118	5	3	2	0.85620	128.230	1.7
119	4	5	2	0.85480	128.618	0.3
120	5	4	1	0.85390	128.870	0.2
121	1	5	4	0.85250	129.245	1.7
122	2	0	5	0.85070	129.779	0.6
123	6	0	0	0.84640	131.036	0.7
124	4	0	4	0.84400	131.756	1.6
125	2	1	5	0.84400	131.756	1.6
126	5	0	3	0.84190	132.398	1.2
127	6	1	0	0.83980	133.052	1.3
128	0	3	5	0.83760	133.750	3.7
129	5	1	3	0.83540	134.462	2.1
130	2	7	2	0.83540	134.462	2.1
131	6	0	1	0.83200	135.591	0.1
132	4	6	1	0.82640	137.534	4.3
133	1	3	5	0.82640	137.534	4.3
134	2	2	5	0.82480	138.110	1.8
135	3	7	1	0.82200	139.142	0.2
136	6	2	0	0.82090	139.556	0.9
137	3	4	4	0.82000	139.899	0.6
138	2	5	4	0.81860	140.439	1.2
139	4	2	4	0.81860	140.439	1.2
140	1	8	1	0.81670	141.187	1.8
141	5	2	3	0.81670	141.187	1.8
142	5	4	2	0.81140	143.371	0.9
143	6	2	1	0.80760	145.037	1.8
144	1	7	3	0.80000	148.678	0.8
145	2	8	0	0.79850	149.455	2.3

## Name and formula

Reference code: 01-077-9136  
Compound name: Iron Carbide  
Empirical formula:  $\text{CFe}_3$   
Chemical formula:  $\text{Fe}_3\text{C}$

## Crystallographic parameters

Crystal system: Hexagonal  
Space group: P6322  
Space group number: 182

a (Å): 4.4965  
b (Å): 4.4965  
c (Å): 4.2036  
Alpha (°): 90.0000  
Beta (°): 90.0000  
Gamma (°): 120.0000

Volume of cell ( $10^{-6} \text{ pm}^3$ ): 73.60  
Z: 2.00

RIR: 6.57

## Subfiles and quality

Subfiles: Alloy, metal or intermetallic  
ICSD Pattern  
Inorganic  
Quality: Hypothetical (H)

## Comments

ANX: NO3  
Creation Date: 11/15/2010  
Modification Date: 1/22/2011  
ANX: NO3  
Analysis: C1 Fe3  
Formula from original source: Fe3 C  
ICSD Collection Code: 163151  
Hypothetical Structure: Structure calculated theoretically  
Calculated Pattern Original Remarks: Calculation by density functional theory in the LDA approximation  
In the GGA approximation:  
a= 4.6397, c= 4.3104, x(Fe)= 0.32202  
Minor Warning: No a.s.d reported/abstracted on the cell dimension  
Wyckoff Sequence: g c (P6322)  
Unit Cell Data Source: Powder Diffraction.

## References

Primary reference: Calculated from ICSD using POWD-12++  
Structure: Lv, Z.Q., Zhang, F.C., Sun, S.H., Wang, Z.H., Jiang, P., Zhang, W.H., Fu, W.T., *Comput. Mater. Sci.*, **44**, 690, (2008)

## Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I (%)
1	1	0	0	3.89410	22.618	0.2
2	1	0	1	2.85670	31.287	1.5
3	1	1	0	2.24820	40.074	20.3
4	0	0	2	2.10180	42.999	25.0
5	1	1	1	1.98250	45.729	100.0
6	2	0	0	1.94700	46.611	1.2
7	1	0	2	1.84960	49.224	0.7
8	2	0	1	1.76670	51.699	0.2
9	1	1	2	1.53540	60.224	14.0
10	2	1	0	1.47180	63.110	0.1
11	2	0	2	1.42840	65.269	0.2
12	2	1	1	1.38910	67.397	1.3
13	1	0	3	1.31840	71.503	0.1
14	3	0	0	1.29800	72.805	11.2
15	3	0	1	1.24020	76.794	0.1
16	2	1	2	1.20560	79.425	0.1
17	1	1	3	1.18920	80.744	10.5
18	2	0	3	1.13730	85.247	0.1
19	2	2	0	1.12410	86.512	1.0
20	3	0	2	1.10440	88.451	8.5
21	2	2	1	1.08600	90.356	6.4
22	3	1	0	1.08000	90.998	0.1
23	0	0	4	1.05090	94.275	1.4
24	3	1	1	1.04600	94.855	0.3
25	2	1	3	1.01480	96.764	0.3

26	1	0	4	1.01480	98.764	0.3
27	2	2	2	0.99130	101.984	1.8
28	4	0	0	0.97350	104.608	0.1
29	3	1	2	0.96060	106.623	0.3
30	1	1	4	0.95200	108.024	1.1
31	3	0	3	0.95200	108.024	1.1
32	4	0	1	0.94840	108.625	0.1
33	2	0	4	0.92480	112.803	0.1
34	3	2	0	0.89340	119.132	0.2
35	4	0	2	0.86940	121.377	0.3
36	2	2	3	0.87660	122.932	3.0
37	3	2	1	0.87380	123.660	0.3
38	3	1	3	0.85540	128.452	0.2
39	2	1	4	0.85540	128.452	0.2
40	4	1	0	0.84960	130.038	0.7
41	4	1	1	0.83290	135.289	5.1
42	3	2	2	0.82220	139.067	0.2
43	1	0	5	0.82220	139.067	0.2
44	3	0	4	0.81680	141.148	4.0
45	4	0	3	0.79950	148.934	0.1

## Name and formula

Reference code: 01-089-2005  
Compound name: Iron Carbide  
Empirical formula:  $\text{CFe}_3$   
Chemical formula:  $\text{Fe}_3\text{C}$

## Crystallographic parameters

Crystal system: Hexagonal  
Space group: P6322  
Space group number: 182

a (Å): 4.7670  
b (Å): 4.7670  
c (Å): 4.3540  
Alpha (°): 90.0000  
Beta (°): 90.0000  
Gamma (°): 120.0000

Volume of cell ( $10^{-6} \text{ nm}^3$ ): 85.69  
Z: 2.00

RIR: 6.93

## Subfiles and quality

Subfiles: Alloy, metal or intermetallic;  
Common Phase  
ICSD Pattern  
Quality: Inorganic  
Indexed (j)

## Comments

ANX: NC3  
Creation Date: 11/20/2008  
Modification Date: 1/19/2011  
ANX: NC3  
Analysis: C1 Fe3  
Formula from original source:  $\text{Fe}_3\text{C}$   
ICSD Collection Code: 42542  
Minor Warning: No s.d.s reported/abstracted on the cell dimension. No R factors reported/abstracted  
Wyckoff Sequence: g d(P6322)  
Unit Cell Data Source: Powder Diffraction.

## References

Primary reference: Calculated from ICSD using POWD-12++  
Structure: Yabli, H.L., *Int. Mater. Rev.*, **30**, 17, (1985)

## Peak list

No.	h	k	l	d (Å)	2Theta(deg)	I (%)
1	1	0	0	4.12630	21.508	0.7
2	1	0	1	2.99580	29.799	1.5
3	1	1	0	2.38350	37.711	20.4
4	0	0	2	2.17700	41.444	22.6
5	1	1	1	2.09070	43.239	100.0
6	1	0	2	1.92570	47.158	0.1
7	2	0	1	1.86520	48.785	0.2
8	1	1	2	1.60740	57.269	14.2
9	2	1	0	1.56040	59.162	0.1
10	2	0	2	1.49790	61.895	0.1
11	2	1	1	1.44890	63.257	0.1
12	3	0	0	1.37610	66.080	12.6
13	3	0	1	1.31210	71.899	0.1
14	2	1	2	1.26820	74.803	0.1
15	1	1	3	1.23940	76.838	10.4
16	2	2	0	1.19180	80.531	1.2
17	2	0	3	1.18720	80.908	0.1
18	3	0	2	1.16320	82.940	9.3
19	2	2	1	1.14950	84.152	7.2
20	3	1	1	1.10740	88.149	0.1
21	0	0	4	1.08850	90.091	1.4
22	2	1	3	1.06270	92.913	0.1
23	1	0	4	1.05250	94.088	0.1
24	2	2	2	1.04540	94.927	1.9
25	4	0	0	1.03210	96.549	0.1
26	3	1	2	1.01340	98.949	0.1
27	4	0	1	1.00430	100.171	0.1

28	1	1	4	0.99010	102.156	1.0
29	2	0	4	0.96280	106.272	0.1
30	3	2	0	0.94710	108.844	0.1
31	4	0	2	0.93260	111.374	0.1
32	3	2	1	0.92550	112.673	0.1
33	2	2	3	0.92100	113.818	3.0
34	4	1	0	0.90090	117.527	0.8
35	3	1	3	0.89690	117.949	0.1
36	2	1	4	0.89270	119.285	0.1
37	4	1	1	0.88220	121.655	5.3
38	3	2	2	0.86850	124.960	0.1
39	3	0	4	0.85370	126.926	3.6
40	4	0	3	0.84110	132.646	0.1
41	4	1	2	0.83240	135.456	1.9
42	5	0	0	0.82370	137.785	0.1
43	1	1	5	0.81790	140.713	2.3
44	5	0	1	0.81120	143.457	0.1
45	2	2	4	0.80370	146.848	0.6

### Name and formula

Reference code: 00-006-0670  
Compound name: Iron Carbide  
Empirical formula:  $\text{CFe}_3$   
Chemical formula:  $\text{Fe}_3\text{C}$

### Crystallographic parameters

Crystal system: Hexagonal  
Space group:  $\text{P6}_3\text{22}$   
Space group number: 182

a (Å): 4.7670  
b (Å): 4.7670  
c (Å): 4.3490  
Alpha (°): 90.0000  
Beta (°): 90.0000  
Gamma (°): 120.0000

Volume of cell ( $10^{-6} \text{ nm}^3$ ): 85.59  
Z: 2.00

RIR: -

### Status, subfiles and quality

Status: Marked as deleted by ICDD  
Subfiles: Alloy, metal or intermetallic  
Common Phase  
Inorganic  
Quality: Blank (B)

### Comments

Creation Date: 1/1/1970  
Modification Date: 1/11/2011  
Deleted or Rejected By: Deleted by 00-036-1249  
General Comments: This hexagonal form decomposes above 300° to Hägg (chi) carbide which decomposes in one hour at 550° to cementite and free carbon  
Unit Cell: Pattern may also be indexed using a subcell with a=2.754  
Unit Cell Data Source: Powder Diffraction.

### References

Primary reference: Hofer et al., *J. Am. Chem. Soc.*, **71**, 189, (1949)

### Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta(deg)	I (%)
1	1	1	0	2.38000	37.768	40.0
2	0	0	2	2.16900	41.404	60.0
3	1	1	1	2.08500	43.363	100.0
4	1	1	2	1.60700	57.285	60.0
5	3	0	0	1.37700	68.029	60.0
6	1	1	3	1.23800	76.956	60.0
7	3	0	2	1.16300	82.957	60.0

### Name and formula

Reference code: 00-006-0698  
Mineral name: Cohénite  
Compound name: Iron Carbide  
Empirical formula:  $\text{CFe}_3$   
Chemical formula:  $\text{Fe}_3\text{C}$

### Crystallographic parameters

Crystal system: Orthorhombic  
Space group: Pbnm  
Space group number: 62  
a (Å): 4.5234  
b (Å): 5.0883  
c (Å): 6.7426  
Alpha (°): 90.0000  
Beta (°): 90.0000  
Gamma (°): 90.0000  
Volume of cell ( $10^{-6} \text{ nm}^3$ ): 155.19  
Z: 4.00  
RIR: -

### Status, subfiles and quality

Status: Marked as deleted by ICDD  
Subfiles: Alloy, metal or intermetallic  
Common Phase  
Inorganic  
Mineral  
Quality: Blank (B)

### Comments

Creation Date: 1/1/1970  
Modification Date: 1/11/2011  
Deleted Or Rejected By: Deleted by 00-023-1113  
Unit Cell Data Source: Powder Diffraction.

### References

Primary reference: Lipson, Petch., *J. Iron Steel Inst., London*, **142**, 95, (1940)

### Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta(deg)	I [%]
1	0	2	0	2.54000	35.308	6.0
2	0	2	1	2.38000	37.768	65.0
3	2	0	0	2.36000	39.856	25.0
4	1	2	0	2.20000	40.991	25.0
5	1	2	1	2.10000	43.038	60.0
6	2	1	0	2.08000	43.917	70.0
7	0	2	2	2.03000	44.833	60.0
8	1	0	3	2.01000	45.068	100.0
9	2	1	1	1.97000	46.035	55.0
10	1	1	3	1.87000	48.652	30.0
11	1	2	2	1.85000	49.212	40.0
12	2	1	2	1.76000	51.911	16.0
13	0	2	3	1.68000	54.582	16.0
14				1.61000	57.168	8.0
15	1	2	3	1.58000	58.357	20.0

## Name and formula

Reference code: 01-078-5298  
Compound name: Iron Carbide  
Empirical formula:  $\text{CFe}_3$   
Chemical formula:  $\text{Fe}_3\text{C}$

## Crystallographic parameters

Crystal system: Orthorhombic  
Space group: *Pnma*  
Space group number: 62

*a* (Å): 4.8930  
*b* (Å): 6.6930  
*c* (Å): 4.4420  
Alpha (°): 90.0000  
Beta (°): 90.0000  
Gamma (°): 90.0000

Volume of cell ( $10^6 \text{ pm}^3$ ): 148.44  
Z: 4.00

RIR: 2.02

## Status, subfiles and quality

Status: Alternate Pattern  
Subfiles: Alloy, metal or intermetallic  
ICSD Pattern  
Inorganic  
Quality: Hypothetical (H)

## Comments

ANX: NO3  
Creation Date: 11/15/2010  
Modification Date: 1/22/2011

ANX: NO3  
Analysis:  $\text{C1 Fe}_3$   
Formula from original source:  $\text{Fe}_3\text{C}$   
ICSD Collection Code: 167126  
Hypothetical Structure: Structure calculated theoretically  
Calculated Pattern Original Remarks: Calculation with CASTEP code  
Calculated lattice constant for Fe: 2.8243 (SG Im3-m)  
Minor Warning: No *a.s.d* reported/abstracted on the cell dimension  
Wyckoff Sequence: d (2) (Pnma)  
Unit Cell Data Source: Powder Diffraction.

## References

Primary reference: Calculated from ICSD using POWD-12++  
Structure: Wang Xian, Yan Mulu, *Int. J. Mod. Phys. B*, 23, 1135, (2009)

## Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	0	1	1	3.70110	24.025	0.3
2	0	2	0	3.34650	26.615	0.5
3	1	0	1	3.31870	26.843	0.4
4	1	1	1	2.97330	30.030	1.8
5	2	0	0	2.49650	35.944	1.9
6	1	2	1	2.35650	38.159	27.0
7	2	1	0	2.33910	38.454	25.0
8	0	0	2	2.22100	40.587	22.2
9	2	0	1	2.17630	41.458	19.1
10	2	1	1	2.06970	43.700	54.1
11	1	0	2	2.02930	44.616	48.1
12	2	2	0	2.00100	45.282	51.2
13	0	3	1	1.99370	45.457	100.0
14	1	1	2	1.94200	46.738	47.0
15	1	3	1	1.85150	49.170	29.2
16	0	2	2	1.85150	49.170	29.2
17	2	2	1	1.82450	49.847	41.9
18	1	2	2	1.73520	52.709	14.5
19	0	4	0	1.67320	54.823	3.2
20	2	3	0	1.66350	55.169	11.8
21	2	1	2	1.61060	57.145	5.8
22	2	3	1	1.55850	59.242	13.2
23	3	0	1	1.55850	59.242	13.2
24	3	1	1	1.51790	60.992	2.9



25	1	3	2	1.50120	61.744	0.5
26	1	4	1	1.49410	62.070	2.3
27	2	2	2	1.48660	62.418	6.3
28	0	1	3	1.44570	64.393	0.1
29	1	0	3	1.41960	65.724	0.1
30	3	2	1	1.41280	66.081	0.2
31	1	1	3	1.38990	67.313	4.6
32	2	4	0	1.38990	67.313	4.6
33	0	4	2	1.33640	70.395	0.2
34	2	3	2	1.33150	70.693	1.4
35	3	0	2	1.33150	70.693	1.4
36	2	4	1	1.32650	71.000	2.3
37	1	2	3	1.30680	72.237	13.0
38	3	1	2	1.30680	72.237	13.0
39	1	4	2	1.29100	73.263	0.1
40	0	5	1	1.28170	73.883	1.1
41	3	3	1	1.27760	74.160	0.3
42	2	0	3	1.27350	74.439	0.1
43	2	1	3	1.25110	76.005	0.1
44	4	0	0	1.24820	76.214	0.1
45	1	5	1	1.24140	76.707	1.2
46	3	2	2	1.23750	76.993	2.1
47	4	0	1	1.20170	79.734	10.0
48	1	3	3	1.19770	80.054	12.7
49	2	2	3	1.19020	80.662	0.2
50	4	1	1	1.18280	81.272	1.9
51	2	5	0	1.17970	81.531	4.4
52	4	2	0	1.16950	82.395	0.9
53	3	3	2	1.14360	84.687	13.7
54	3	4	1	1.14020	84.999	8.0
55	2	5	1	1.14020	84.999	8.0
56	4	2	1	1.13100	85.856	0.5
57	1	5	2	1.11740	87.160	6.4
58	0	6	0	1.11550	87.346	5.2
59	0	0	4	1.11050	87.840	1.6
60	3	0	3	1.10620	88.269	8.5
61	2	3	3	1.10620	88.269	8.5
62	3	1	3	1.09140	89.787	1.6
63	4	3	0	1.08930	90.007	7.8
64	1	0	4	1.08400	90.569	4.0
65	1	4	3	1.08250	90.729	3.0
66	1	1	4	1.07010	92.082	2.0
67	1	6	1	1.05800	93.450	0.1
68	4	3	1	1.05800	93.450	0.1
69	3	2	3	1.05040	94.334	0.6
70	3	4	2	1.04190	95.347	2.3
71	2	5	2	1.04190	95.347	2.3
72	4	2	2	1.03480	96.214	0.5
73	1	2	4	1.03130	96.649	1.0
74	2	6	0	1.01840	98.293	0.1
75	3	5	1	1.01550	98.672	0.6
76	2	0	4	1.01550	98.672	0.6
77	2	4	3	1.01340	98.949	0.1
78	2	1	4	1.00320	100.321	0.5
79	4	4	0	1.00050	100.693	0.2
80	0	6	2	0.99680	101.207	1.1
81	0	5	3	0.99270	101.785	0.8
82	2	6	1	0.99270	101.785	0.8
83	3	3	3	0.99110	102.013	0.1
84	4	3	2	0.97750	104.004	4.0
85	1	6	2	0.97750	104.004	4.0
86	4	4	1	0.97610	104.214	0.6
87	1	5	3	0.97390	104.548	2.5
88	5	0	1	0.97390	104.548	2.5
89	2	2	4	0.97100	104.991	1.1
90	5	1	1	0.96410	106.066	0.6
91	4	0	3	0.95440	107.628	0.1
92	3	5	2	0.94410	109.355	0.8
93	4	1	3	0.94410	109.355	0.8
94	5	2	1	0.93540	110.873	0.9
95	0	7	1	0.93470	110.998	0.8
96	2	6	2	0.92530	112.710	0.1
97	0	4	4	0.92530	112.710	0.1
98	2	3	4	0.92360	113.028	0.3
99	3	0	4	0.92360	113.028	0.3
100	2	5	3	0.92280	113.178	0.3
101	3	4	3	0.92280	113.178	0.3
102	1	7	1	0.91880	113.938	0.1
103	4	5	0	0.91290	115.086	0.4
104	4	4	2	0.91220	115.224	0.3
105	5	0	2	0.91080	115.503	0.1
106	3	6	1	0.90710	116.247	1.9
107	5	1	2	0.90250	117.193	0.7
108	4	5	1	0.89420	118.957	0.9
109	5	3	1	0.89290	119.241	0.1
110	2	7	0	0.89290	119.241	0.1

111	3	2	4	0.89040	119.792	0.8
112	0	1	5	0.08070	122.006	0.1
113	5	2	2	0.87880	122.455	2.7
114	2	7	1	0.87540	123.270	0.4
115	2	4	4	0.86760	125.209	0.4
116	1	1	5	0.86760	125.209	0.4
117	1	7	2	0.86490	125.903	0.7
118	3	3	4	0.85350	126.982	5.5
119	1	2	5	0.84620	131.095	0.5
120	4	5	2	0.84440	131.435	0.3
121	5	3	2	0.84320	131.999	1.1
122	5	4	1	0.84240	132.244	1.8
123	1	5	4	0.84240	132.244	1.8
124	2	6	3	0.83910	133.273	0.1
125	2	0	5	0.83700	133.943	0.6
126	0	8	0	0.83700	133.943	0.6
127	4	6	0	0.83220	135.524	0.9
128	6	0	0	0.83220	135.524	0.9
129	2	1	5	0.83050	136.101	1.4
130	5	0	3	0.82790	137.003	0.7
131	2	7	2	0.82790	137.003	0.7
132	6	1	0	0.82540	137.893	3.5
133	0	3	5	0.82540	137.893	3.5
134	5	1	3	0.82140	139.292	2.0
135	4	6	1	0.81760	140.831	4.0
136	6	0	1	0.81760	140.831	4.0
137	1	3	5	0.81430	142.158	0.9
138	2	2	5	0.81200	143.116	1.4
139	6	1	1	0.81200	143.116	1.4
140	1	8	1	0.81120	143.457	0.7
141	3	4	4	0.80860	144.590	1.1
142	2	5	4	0.80860	144.590	1.1
143	6	2	0	0.80760	145.037	0.5
144	4	2	4	0.80530	146.092	0.3
145	5	2	3	0.80370	146.848	1.5
146	0	7	3	0.80370	146.848	1.5
147	5	4	2	0.79990	146.729	1.0

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## UCAPAN TERIMA KASIH

Pada pengerjaan tugas akhir ini penulis banyak mendapat bantuan dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Ayah, Ibu, Kakak, dan Adik tercinta, Bapak Faidulloh, Ibu Sapta Suryani, Sariyatul Wahyuni, Qurrota A'yun, serta seluruh keluarga yang telah memberikan banyak doa, dukungan, dan motivasi.
2. Budi Agung Kurniawan, S.T., M.Sc dan Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc selaku dosen pembimbing tugas akhir penulis yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu selama pengerjaan tugas akhir.
3. Deno Mandrial, S.T. selaku pembimbing dari PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu selama pengerjaan tugas akhir.
4. Dr. Agung Purniawan, S.T., M,Eng selaku Ketua Departemen Teknik Material FTI – ITS.
5. Dr. Eng. Hosta Ardhyananta S.T., M.Sc. selaku Kepala Program Studi Departemen Teknik Material FTI-ITS.
6. Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc selaku dosen wali yang selalu memberikan bimbingan selama penulis menjalani masa perkuliahan.
7. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Material FTI-ITS yang telah membimbing penulis hingga selesainya laporan ini.
8. Ici sebagai rekan selama mengerjakan tugas akhir, Ihsan, Mela, Tutut, Anggun, Bani, dan Reja, yang selalu menemani serta memberikan bantuan dan motivasi kepada penulis.
9. Imbang, Hana, Iqbal, Ilham, dan Fiqhi yang banyak memberikan bantuan dan motivasi kepada penulis.
10. Teman-teman Pejuang Laboratorium Metalurgi yang telah berjuang bersama dalam menyelesaikan tugas akhir.

11. Majdi, Andika, Epi, Dhani, Ihsan, Ici, Mail, Yogi, dll yang tergabung dalam Super Alloy yang telah memberikan cerita dan pembelajaran selama masa perkuliahan penulis.
12. PSDM HMMT FTI-ITS 15/16 yang telah memberikan cerita dan pembelajaran selama masa perkuliahan penulis.
13. Teman-teman seperjuangan MT15 yang memberikan banyak cerita dalam kehidupan penulis.
14. Pamandu KOMPAS FTI-ITS yang telah memberikan cerita dan pembelajaran selama masa perkuliahan penulis.
15. Serta seluruh pihak yang belum bisa dituliskan satu per satu oleh penulis. Terimakasih atas dukungan dan bantuan teman-teman sekalian.

## BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Sidoarjo, 6 Februari 1995, merupakan anak kedua dari 2 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di TK Dharma Wanita Persatuan Rangkah Kidul, SDN Rangkah Kidul, kemudian SMPN 3 Sidoarjo, dan SMAN 2 Sidoarjo. Setelah itu, penulis melanjutkan studi melalui jalur SNMPTN di Departemen Teknik Material ITS pada tahun 2013 dan terdaftar dengan NRP 2713100034. Di Departemen Teknik Material, penulis memilih bidang studi Metalurgi dan Manufaktur.

Pada masa perkuliahan penulis menjadi Staff PSDM HMMT FTI-ITS 14/15 dan Wakil II Kepala Departmen PSDM HMMT FTI-ITS 15/16. Penulis juga aktif sebagai Pemandu FTI-ITS. Beberapa pelatihan seperti LKMM Pra TD, LKMM TD, PP LKMM IX, dan PMO HMMT FTI-ITS pernah diikuti oleh penulis. Dalam kegiatan akademis penulis aktif sebagai Asisten Laboratorium Fisika Material dan Asisten Laboratorium Korosi dan Analisa Kegagalan. Penulis memiliki pengalaman kerja praktik di PT. PJB UP Gresik pada bulan Agustus 2016. Selama kerja praktik penulis mendalami topik terkait analisis kegagalan

Tugas akhir yang diambil penulis dalam Metalurgi dan Manufaktur yaitu “Analisis Pengaruh Variasi Temperatur dan Waktu Tahan *Tempering* terhadap Sifat Kekerasan dan Ketahanan Aus Material ASTM A532 *Class III Type A* yang Di-*hardening* sebagai Solusi Kegagalan *Chute Inlet Feed Liner* pada *Vertical Roll Mill*”.

*Email:* qorymaghfiroh@gmail.com

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*